

面向立柱栽培的移栽机器人设计与协调运动仿真*

刘继展¹ 刘 炜¹ 毛罕平¹ 席 宁² 李萍萍³

(1. 江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 镇江 212013;

2. 美国密歇根州立大学电子与计算机工程系, 东兰辛 48824;

3. 南京林业大学森林资源与环境学院, 南京 210037)

摘要: 针对新型螺旋栽培立柱结构进行了配套移栽机器人系统的设计。通过几何与静力学分析,确定了插针式末端执行器的驱动电磁铁选型与机构参数。通过立柱的穴盘苗机器人移栽协调运动仿真,确定了机械手结构参数与系统优化布局,得到了多执行元件协调运动时序关系并建立了移栽协调运动流程。样机试验结果表明,机械手平均水平与竖直定位误差分别为 2.24 m 和 0.63 m,移栽成功率为 94.7%。立柱 1.2 m 高度范围的移栽作业效率为 750 株/h,末端执行器取苗时间仅为 0.2 s,能够满足立柱自动化移栽作业的要求。

关键词: 立柱栽培 移栽机器人 协调运动 仿真

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)07-0048-06

引言

立柱栽培是一种新型的设施农业栽培模式,通过树立的柱体使栽培由平面向空间扩展,以充分利用温室空间和太阳能,从而大大提高土地和温室设施利用效率,具有广阔的发展前景^[1-7]。但是,栽培立柱的高度与竖直栽种特点决定了人工进行栽植、管理和收获的难度和强度极大,成为限制立柱栽培技术推广的关键瓶颈问题。

秧苗移栽是设施蔬菜花卉生产耗时和劳动强度最大的环节之一,而面向立柱的人工移栽难度远远超过换盘移栽与田间移栽,因而实现面向立柱的穴盘苗自动化移栽成为推动立柱栽培技术推广普及、提高设施生产效率、解放劳动力的必然要求和客观发展趋势。但是已有穴盘苗自动化移栽装备均针对换盘移栽或田间移栽任务^[8-27],而由于栽培立柱的竖直特性,栽植位的高度变化和多立柱位置变化对其配套移栽机器人及移栽控制提出了特殊要求,现有自动化移栽装备与作业模式无法满足温室多栽培立柱的自动移栽管理需要。

针对上述问题,本文针对自主开发的新型螺旋栽培立柱结构,进行配套移栽机器人系统的设计开发,并完成移栽作业的多机构协调运动仿真与样机试验。

1 整机结构设计

1.1 作业对象

针对目前吊袋式、叠盆式和插管式等栽培立柱结构栽植位离散分布的问题(图 1a、1b),笔者提出了螺旋式栽培立柱结构^[28],使栽培槽沿螺旋线上下贯穿,由于连续栽培面的产生而比现有结构更加有利于水肥的均匀流动和自动化栽植、收获的实现,同时立柱可通过旋转实现均匀采光(图 1c)。

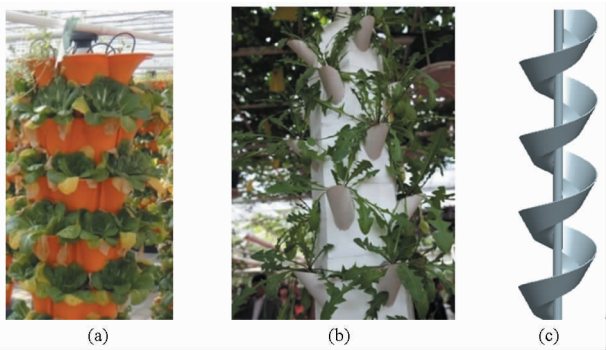


图 1 栽培立柱的不同结构

Fig. 1 Culture columns with different structure

(a) 叠盆式 (b) 插管式 (c) 螺旋式

1.2 设计要求

与大田移栽和穴盘苗换盘移栽相比,穴盘苗的立柱自动化移栽存在明显差异:

(1)栽植位由平面分布变为竖直分布,自动作

收稿日期: 2013-08-12 修回日期: 2013-09-20

* 中国博士后科学基金资助项目(2012M521013)和江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

作者简介: 刘继展,副研究员,博士,主要从事农业机器人研究,E-mail: liujizhan@163.com

业装备必须实现末端的大范围竖直运动。

(2)需要通过立柱的旋转将栽植位送至面向机械手一侧,并实现自动移栽装备与立柱的协调动作。

(3)对温室内多立柱的移栽管理,要求装备具有移动作业能力。

1.3 型设计

根据上述特殊要求,开发的螺旋栽培立柱配套移栽机器人样机由 PRRR 型机械手、电磁铁驱动插针式末端执行器、翻转式多穴盘自动供苗装置和轨道式自主移动平台构成,具体结构如图 2 所示。

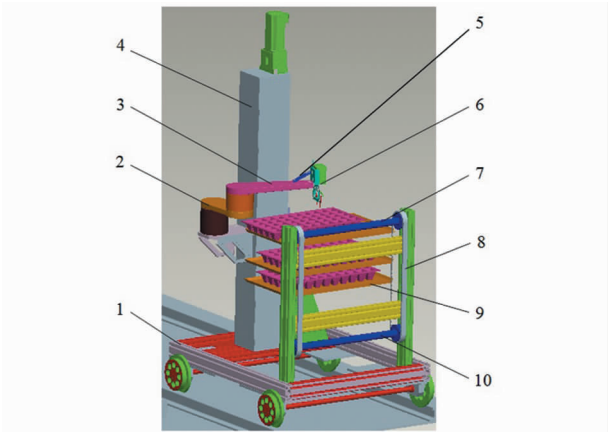


图 2 螺旋栽培立柱配套移栽机器人系统

Fig. 2 Seedling transplanting robot for spiral column

1. 自主移动平台 2. 大臂 3. 小臂 4. 竖直滑轨 5. 末端姿态调节机构 6. 末端执行器 7. 上轴 8. 同步带 9. 托盘 10. 下轴

1.3.1 PRRR 型移栽机械手

在公认最适用于平面定位、垂直方向装配作业的 SCARA 机械手的基础上,保留其大臂、小臂水平回转的平面定位特点,针对立柱移栽需要在其肩部通过竖直滑轨提供大竖行程,3 关节分别由伺服电动机驱动。同时,在腕部去除水平回转与升降等 2 个自由度,而增加由电磁铁驱动的末端姿态转动调节结构,以满足斜插入立柱栽培空间的需要。由上述大小臂回转、肩部竖直移动与腕部转动组合构成 4 自由度 PRRR 型移栽机械手(图 2)。

1.3.2 电磁铁驱动插针式末端执行器

国内外开发的各类移栽末端执行器^[11,15,22-27],普遍存在入土后手指倾角的不断变化问题,从而对取苗顺畅性造成不利影响,并可能导致苗坨破碎现象的增加。为此,提出了图 3 所示插针式末端执行器结构,两插针沿固定滑套入土取苗,在取苗过程中的方位线保持恒定,从而有效避免了手指倾角变化所造成的不利影响。末端执行器由自动复位拉式电磁铁驱动,避免了现有电动机^[11,13,27]或气缸^[15,17,20,22,24-26]驱动末端执行器的结构及控制复杂问题。

1.3.3 翻转式多穴盘自动供苗装置

多量供苗是提高移栽机或移动式移栽机器人作业效率的关键问题,现有装备仅能实现多个穴盘的携带,其换盘仍需人工实现。翻转式多穴盘自动供苗装置将穴盘置于由同步带携带的多个托盘上,当上方穴盘内的秧苗移栽完毕后,步进电动机带动同步带运动,将下一带苗穴盘送至移栽取苗位置,同时空穴盘翻转至后方落下,从而实现多穴盘苗的携带与自动供应。

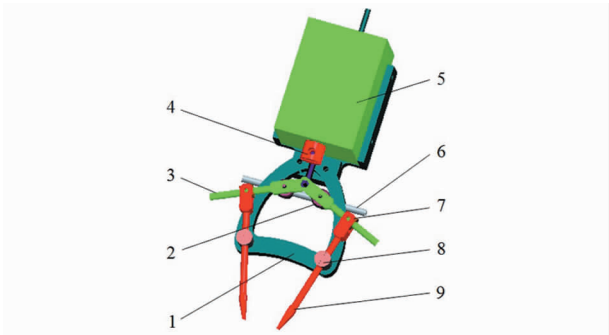


图 3 电磁铁驱动插针式末端执行器

Fig. 3 Double-needle electromagnet-driven end-effector

1. 基板 2. 水平滑块 3. 摆杆 4. 电磁铁拉杆 5. 电磁铁 6. 水平导杆 7. 摆杆滑块 8. 滑套 9. 插针

1.4 工作原理

穴盘苗向螺旋栽培立柱自动移栽作业时,自主移动平台沿轨移动并定位于待栽植立柱位置,同时螺旋栽培立柱通过间歇转动,将不同栽植位送至靠近机械手一侧。机械手完成末端执行器对穴孔与栽植位的定位和穴孔与栽植位间的秧苗移送,并由末端执行器完成取苗与栽植任务。分别由供苗装置的翻转和移动平台的沿轨行走实现自动换盘供苗和对多栽培立柱的移栽作业管理。

2 电磁铁驱动末端执行器参数设计

作为通电动作型电磁元件,电磁铁的动铁与线圈间通过电磁力作用来实现推(拉)杆的运动,具有瞬时不可控特征。因而必须通过合理的末端执行器结构参数设计与电磁铁选型,才能同时满足插针入土深度、入土力和对苗坨的夹持力等关键参数要求,保证末端执行器顺利实现苗坨不破损的移栽取苗。

2.1 末端执行器的几何学分析

插针的入土深度是移栽末端执行器的关键参数

$$H = S \cos \beta - \Delta H \tag{1}$$

式中 H ——插针入土深度,根据穴盘规格取 30 mm
 S ——插针的行程,mm
 β ——插针倾角,根据穴盘规格取 8°
 ΔH ——插针最小离地高度,取 5 mm
而插针的行程 S 为其沿固定方位移动时始、末

两位置间的距离,由图 4a,根据机构的几何关系有

$$S = \frac{l_{DE} - l_{AB} \cos \alpha_2}{\cos(\alpha_2 - \beta)} \sin \alpha_2 - \frac{l_{DE} - l_{AB} \cos \alpha_1}{\cos(\alpha_1 - \beta)} \sin \alpha_1 \quad (2)$$

式中 l_{DE} ——电磁铁拉杆、插针与水平导轨中心线
两交点间的距离,mm

l_{AB} ——摆杆 AB 段长度,mm

α_1 ——摆杆的初始倾角, (°)

α_2 ——插针行程结束时的摆杆倾角, (°)

根据机构的几何关系,有

$$\alpha_2 = \arcsin(\sin \alpha_1 + S_0/l_{AB}) \quad (3)$$

式中 S_0 ——电磁铁拉杆的行程,mm

式(1)~(3)联立,可得到插针的入土深度

$$H = \frac{[l_{DE} - l_{AB} \sqrt{1 - (\sin \alpha_0 + S_0/l_{AB})^2}](\sin \alpha_0 + S_0/l_{AB}) \cos \beta}{(\sin \alpha_0 + S_0/l_{AB}) \cos \beta + \sqrt{1 - (\sin \alpha_0 + S_0/l_{AB})^2} \sin \beta} - \frac{l_{DE} - l_{AB} \cos \alpha_0}{\sin(\alpha_0 + \beta)} \sin \alpha_0 \cos \beta \quad (4)$$

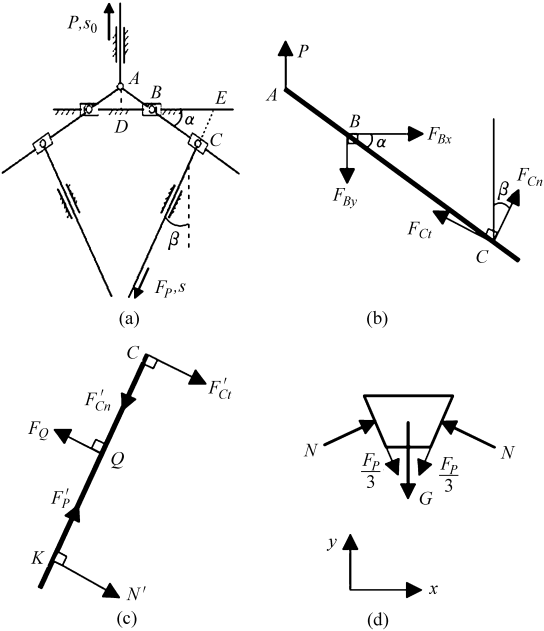


图 4 末端执行器结构简图及力平衡分析
Fig.4 Kinematic sketch and force-balance analysis
of the end-effector

(a) 机构简图 (b) 摆杆力平衡
(c) 插针力平衡 (d) 苗坨力平衡

2.2 末端执行器的静力学分析

末端执行器对称连杆机构中,忽略各构件的质量及运动副摩擦,建立各构件的平面力系平衡方程。由图 4b,摆杆的静力平衡方程为

$$\begin{cases} \sum F_x = 0 \Rightarrow F_{ct} \cos \beta = F_{cn} \sin \beta + F_{bx} \\ \sum F_y = 0 \Rightarrow P/2 + F_{cn} \cos \beta + F_{ct} \sin \beta = F_{by} \\ \sum M_B = 0 \Rightarrow Pl_{AB} \cos \alpha = F_{cn} l_{BC} \cos(\alpha - \beta) - F_{ct} l_{BC} \sin(\alpha - \beta) \quad (\alpha_1 \leq \alpha \leq \alpha_2) \end{cases} \quad (5)$$

式中 P ——电磁铁的拉力,N

F_{bx} ——摆杆 B 点所受水平作用力,N

F_{by} ——摆杆 B 点所受竖直作用力,N

F_{cn} ——摆杆在 C 点所受法向作用力,N

F_{ct} ——摆杆在 C 点所受切向作用力,N

α ——摆杆倾角, (°)

l_{BC} ——摆杆 BC 段长度

根据机构的几何关系有

$$l_{BC} = \frac{l_{DE} - l_{AB} \cos \alpha}{\cos(\alpha - \beta)} \cos \beta \quad (6)$$

由图 4c,插针的静力平衡方程为

$$\begin{cases} \sum F_n = 0 \Rightarrow F'_{cn} = F'_p \\ \sum F_t = 0 \Rightarrow F'_{ct} + N' = F_q \\ \sum M_Q = 0 \Rightarrow F'_{ct} l_{cQ} = N' l_{QK} \end{cases} \quad (7)$$

其中

$$F'_{cn} = F_{cn} \quad F'_{ct} = F_{ct}$$

式中

F'_{cn} ——插针在 C 点所受法向作用力, N

F'_{ct} ——插针在 C 点所受切向作用力, N

N' ——插针所受苗坨的挤压力, N

F'_p ——插针入土力的反力, N

F_q ——插针所受滑槽的作用力, N

l_{cQ} ——C 点与固定滑套支撑点 Q 间距离, mm

l_{QK} ——固定滑套支撑点 Q 与插针所受苗坨挤压力合力作用点 K 间距离, mm

由图 4d,对苗坨有

$$2N \sin \beta = G + 2F_p \cos \beta / 3 \quad (8)$$

式中

N ——苗坨所受插针的夹持力, $N = N'$; 根据试验,当 $N \leq 6$ N 时方能保证苗坨不发生散裂和幼苗根部不受到损伤

G ——苗坨的重力,根据育苗基质及含水量差异取 0.3~0.5 N

F_p ——插针入土力, $F_p = F'_p$, 根据试验,插针的初始入土力 $F_p \geq 10$ N 才能完成顺利入土取苗

2.3 静定问题求解

将式(3)~(8)联立,根据入土深度、夹持力与初始入土力的要求,结合电磁铁的选型,进行电磁铁行程、拉力参数与末端执行器结构参数的运算。其中末端执行器初始入土时刻有

$$N' = F_E = F_{ct} = F'_{ct} = 0 \quad (9)$$

通过计算分析,选择行程 32 mm、初始拉力 70 N、工作电压 8.5 V 的 30 W KSD52-86 型大行程电磁铁,末端执行器结构参数分别为: $l_{AB} = 16$ mm, $l_{DE} = 42$ mm, $\alpha_1 = -30^\circ$, 初始时刻 $l_{cQ} = 63$ mm。插针的入土深度为 30 mm,初始入土力达到 18.7 N,苗

坨夹持力为 3.7 N,达到设计要求。

3 基于仿真的结构、布局与运动流程优化

3.1 末端轨迹的分析与仿真构造

3.1.1 移栽作业的多运动协调

穴盘苗向立柱机器人的移栽作业由多个执行元件的协调动作来实现,其中除立柱、供苗装置等各部件的并联结构以外,还存在机械手的多自由度串联结构,末端轨迹为多个执行元件的运动耦合,需根据末端轨迹逆解,进而实现多执行元件的协调运动仿真。

3.1.2 末端轨迹分析

移栽作业“取苗→送苗→植苗→回位”的周期性运动中,末端需顺序经过图 5(图中 A_i 为取苗底点; B_i 为取苗顶点; C_{i-j} 为中间点; D_j 为植苗顶点(高于 B_i); E_j 为植苗底点; D'_j 为植苗顶点(低于 B_i); E'_j 为植苗底点)所示若干轨迹关键点,以同时满足移栽作业和避障要求。

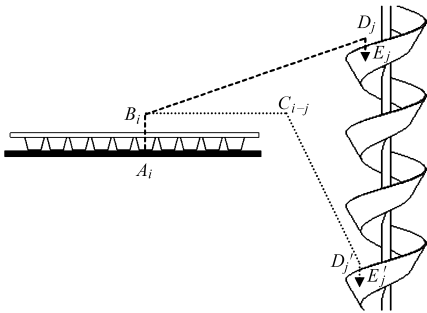


图 5 末端轨迹的构成与轨迹关键点

Fig. 5 Path constitution of the end-effector with key points

由于立柱栽苗位的竖直分布特点,末端轨迹存在竖直坐标的大范围变化。当植苗顶点 D_j 高于取苗顶点 B_i 时,每周期轨迹 1 的关键点顺序为

$$A_i \rightarrow B_i \rightarrow D_j \rightarrow E_j \rightarrow D_j \rightarrow B_{i+1} \rightarrow A_{i+1} \rightarrow$$

当植苗顶点 D_j 低于取苗顶点 B_i 时,为避免末端与穴盘的碰撞,应增加一中间点 C_{i-j} ,使每周期轨迹 2 的关键点顺序变为

$$A_i \rightarrow B_i \rightarrow C_{i-j} \rightarrow D'_j \rightarrow E'_j \rightarrow D'_j \rightarrow C_{(i+1)-j} \rightarrow B_{i+1} \rightarrow A_{i+1} \rightarrow$$

3.1.3 仿真构造

在 Pro/Engineer 环境下建立的螺旋栽培立柱及其配套移栽机器人系统的三维虚拟样机中,分别按轨迹 1 和轨迹 2,拖动末端使其顺序通过轨迹中各关键点,读出此时 Pro/Engineer 自动逆解得到的各电动机角位移值,根据周期分段生成各电动机的时间-角位移轮廓“表”文件,并导入“伺服电动机定义”。同时,按相应周期分段完成其它执行元件的定义。

3.2 仿真内容与结果分析

3.2.1 机械手结构参数与系统布局分析

机器人立柱移栽作业的顺利实现,首先需保证

机械手末端能够到达所有取苗与栽植位,同时各部件间不发生干涉与碰撞。这既取决于机械手的结构参数,又与机械手、供苗装置与立柱 3 者之间的相对布局有紧密关系。

以移栽作业 540 mm × 280 mm 标准育苗穴盘和螺旋栽培槽的内径 37 mm、外径 320 mm 为条件,利用 Pro/Engineer 的机构分析功能执行立柱的穴盘苗机器人移栽协调运动仿真,通过逐步调整机械手尺寸与系统布局,在保证末端可达范围能够有效覆盖所有穴盘取苗位及该工位的立柱植苗位并不发生部件干涉的前提下,使末端路径最短以提高移栽作业效率。

根据仿真结果,确定机械手大臂、小臂长度分别为 200 mm 和 375 mm,肩关节与肘关节的回转范围均为 ±135°,系统的整体布局如图 6 所示。

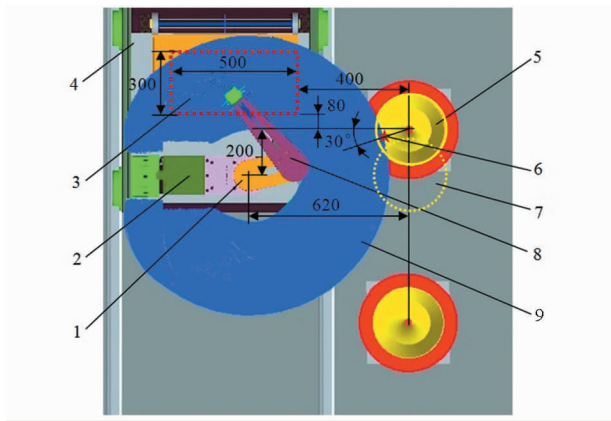


图 6 机械手工作空间与整体布局

Fig. 6 Workspace of the manipulator and workcell layout

1. 大臂 2. 竖直滑轨 3. 穴盘 4. 自主移动平台 5. 螺旋式栽培立柱 6. 栽苗位 7. 螺旋栽培立柱下极限位置 8. 小臂 9. 工作空间

3.2.2 移栽作业协调运动流程

根据运动仿真建立的穴盘苗向立柱机器人移栽单周期多执行元件运动协调时序关系及协调运动流程分别如图 7(图中①末端下降,②末端取苗,③末端上升,④机械手运苗,⑤末端下降,⑥末端植苗,⑦末端放苗,⑧末端上升,⑨回位)和图 8 所示,通过各执行元件的协调动作,使末端完成“下降→取

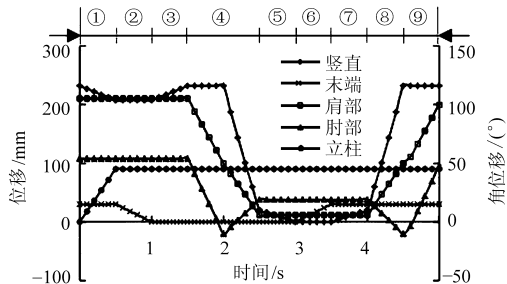


图 7 各执行元件运动协调的时序关系

Fig. 7 Time sequence of coordinated motion of components

苗→上升→运苗→下降→植苗→放苗→上升→回位”的动作流程。为提高作业效率,每周期立柱植苗位调整的旋转动作并行完成。经多周期移栽作业后,完成穴盘更换的供苗装置运动与立柱工位变换的沿轨行走。

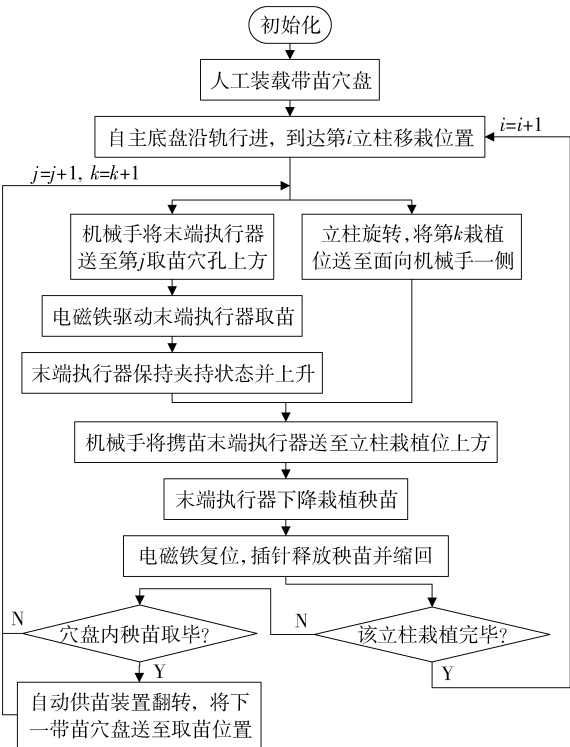


图 8 立柱的穴盘苗机器人移栽协调运动流程
Fig. 8 Flow chart of coordinated motion

4 试验验证

应用螺旋栽培试验立柱与配套移栽机器人样机进行了试验验证(图 9),试验在江苏大学智能玻璃实验温室内进行。试验立柱外径 320 mm,柱高 1 300 mm,螺距 300 mm。栽培对象为意大利生菜,采用尺寸为 540 mm×280 mm 的 50 育苗穴盘,育苗基质含水率 34%,秧苗株高 80~100 mm。试验结果表明,样机结构稳定可靠,自动供苗装置携带 4 满穴盘秧苗能够准确定位和顺利翻转换盘。末端能够到达所有穴盘取苗位及相应工位的立柱植苗位,且过

程中各部件无干涉和碰撞,其平均水平和竖直定位误差分别为 2.24 mm 和 0.63 mm,移栽成功率为 94.7%。按照图 8 协调运动流程能够顺利实现预定的移栽作业,对 1.2 m 高度范围内的立柱移栽效率可达 750 株/h,其中电磁铁驱动末端执行器完成取苗动作的时间仅为 0.2 s。

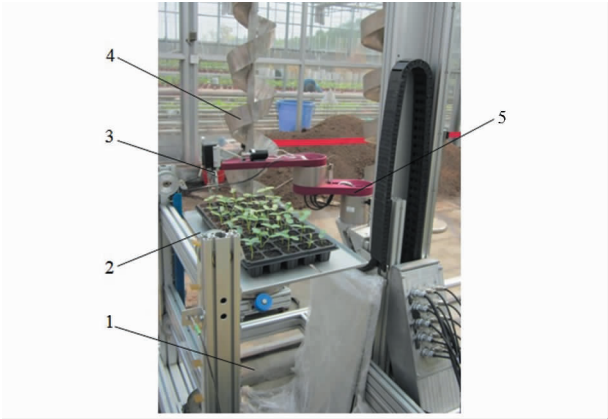


图 9 样机协调运动试验实物图
Fig. 9 Coordinated motion test of the prototype

1. 轨道式自主移动平台 2. 翻转式自动供苗装置 3. 电磁铁驱动插针式末端执行器 4. 螺旋式栽培立柱 5. PRRR 式移栽机械手

5 结论

(1)设计了面向螺旋栽培立柱的穴盘苗移栽机器人系统,由 PRRR 型移栽机械手、电磁铁驱动插针式末端执行器、翻转式自动供苗装置和轨道式自主移动平台构成,为解决立柱栽培生产自动化的关键瓶颈问题提供了技术方案。

(2)通过立柱的穴盘苗机器人移栽协调运动仿真,确定了机械手结构参数与系统的优化布局,得到了各执行元件运动协调的时序关系,进而建立了移栽协调运动流程。

(3)开发了螺旋栽培立柱及其配套移栽机器人样机,试验表明样机结构稳定可靠,机械手平均水平和竖直定位误差分别为 2.24 mm 和 0.63 mm,移栽成功率为 94.7%。立柱 1.2 m 范围的移栽作业效率 750 株/h,末端取苗时间仅为 0.2 s。

参 考 文 献

1 李止正, 龚颂福. 简易柱式无土栽培法[J]. 应用与环境生物学, 2002, 8(6): 666-667.
Li Zhizheng, Gong Songfu. A simple columnar soilless culture method[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2002, 8(6): 666-667. (in Chinese)

2 王久兴, 王子华, 汪晓云. 插管泡沫塑料柱立体无土栽培系统的研制与应用[J]. 江苏农业科学, 2003(4): 50-52.

3 龚颂福, 李止正. 花卉柱式无土栽培[J]. 植物学通报, 2002, 19(4): 477-483.
Gong Songfu, Li Zhizheng. The columnar soilless cultures (CSC) of flower plants[J]. Chinese Bulletin of Botany, 2002, 19(4): 477-483. (in Chinese)

4 刘伟, 刘增鑫. 高效益立柱式无土栽培技术[J]. 沈阳农业大学学报, 2002, 31(2): 137-139.
Liu Wei, Liu Zengxin. High efficiency column soilless culture technique[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2002,

- 31(2): 137–139. (in Chinese)
- 5 王法格,项延军. 花卉立柱式无土栽培模式及其应用前景[J]. 西南园艺,2005,33(2):50–51.
- 6 Ziegler R. The vertical aeroponic growing system[R]. Sausalito, CA: Synergyii International Inc, 2005.
- 7 Wood J. Fruitwise HyGro vertical growing system[R]. <http://testwww.agrovista.co.uk/Content/TechnicalNews/Fruitwise.pdf>.
- 8 Hwang H, Sistler F E. A robotic pepper transplanter [J]. Applied Engineering in Agriculture, 1986, 2(1): 1–5.
- 9 Sakaue O. Development of seedling production robot and automated transplanter system [J]. Japan Agricultural Research Quarterly, 1996, 30: 221–226.
- 10 毛罕平,丁文芹,胡建平,等. 穴盘苗自动移栽机的结构设计及运动仿真分析[J]. 农机化研究,2011(10):75–77,137.
Mao Hanping, Ding Wenqin, Hu Jianping, et al. Structure design and simulation analysis on the plug seedlings auto-transplanter [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011(10): 75–77, 137. (in Chinese)
- 11 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, 47.
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, 47. (in Chinese)
- 12 冯青春,王秀,姜凯,等. 花卉幼苗自动移栽机关键部件设计与试验[J]. 农业工程学报,2013,29(6):21–27.
Feng Qingchun, Wang Xiu, Jiang Kai, et al. Design and test of key parts on automatic transplanter for flower seedling [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(6): 21–27. (in Chinese)
- 13 周婷,汪小岳,王超群,等. 温室穴盘苗移栽机的设计与仿真分析[J]. 机械设计与研究,2009,25(2):121–124.
Zhou Ting, Wang Xiaochan, Wang Chaoqun, et al. Design and simulation analysis of transplanter for potted tray seedlings in greenhouse[J]. Machine Design and Research, 2009, 25(2): 121–124. (in Chinese)
- 14 Ting K C, Giacomelli G A, Shen S J. Robot workcell for transplanting of seedlings part I—layout and materials flow [J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1990, 33(3): 1005–1010.
- 15 Ting K C, Giacomelli G A, Shen S J, et al. Robot workcell for transplanting of seedlings part II—end-effector development[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1990, 33(3): 1013–1017.
- 16 Ting K C, Giacomelli G A, Ling P P. Workability and productivity of robotic plug transplanting workcell[J]. In Vitro Cellular & Developmental Biology-plant, 1992, 28(1):5–10.
- 17 Huřla P, řindelř R, Trinkl A. Verification of applicability of ABB robots for trans-planting seedlings in greenhouses [J]. Research in Agricultural Engineering, 2008, 54(3): 155–162.
- 18 Kutz L G, Miles G E, Hammer P A, et al. Robotic transplanting of bedding plants[J]. Transactions of the ASAE, 1987, 30(3): 586–590.
- 19 Choi W C, Kim D C, Ryu I H, et al. Development of a seedling pick-up device for vegetable transplanters[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 2002, 45(1): 13–19.
- 20 张丽华,邱立春,田素博,等. 指针夹紧式穴盘苗移栽爪设计[J]. 沈阳农业大学学报,2010,41(2):235–237.
Zhang Lihua, Qiu Lichun, Tian Subo, et al. Design of a needle clamping claw for plug seedling transplanting [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2010, 41(2): 235–237. (in Chinese)
- 21 錢中方,林達德. 穴盤種苗移植手端之路徑規劃與分析[J]. 農業工程學報,1996,42(3):69–81.
Chien Chung-fang, Lin Ta-Te. Path planning and analysis of an end-effector for seedling transplanting [J]. Journal of Taiwan Agricultural Engineering, 1996, 42(3): 69–81. (in Chinese)
- 22 任焯. 基于机器视觉设施农业内移栽机器人的研究[D]. 杭州: 浙江大学,2007.
Ren Ye. Development of transplanting robot in facility agriculture based on machine vision [J]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007. (in Chinese)
- 23 黃世欣,林達德. 種苗移植作業夾持具之設計與性能分析[J]. 農業機械學刊,1996,5(3): 51–65.
Hwang Shyh-Shin, Lin Ta-Te. Design and performance analyses of grippers for seedling transplanting [J]. Journal of Agricultural Machinery, 1996, 5(3): 51–65. (in Chinese)
- 24 鄭經緯,黃裕益,陳衍君,等. 氣壓式假植機之研究(I)設計與試驗[J]. 農業機械學刊,1997,6(4): 49–60.
Cheng Ching-Wei, Huang Yu-I, Chen Yen-Chun, et al. The study on pneumatic transplanter(I)—design and test [J]. Journal of Agricultural Machinery, 1997, 6(4):49–60. (in Chinese)
- 25 鄭經緯,黃裕益,陳衍君. 氣壓式假植機之研究(Ⅱ)移栽之定位控制[J]. 農業機械學刊,1998,7(3):75–84.
Cheng Ching-Wei, Huang Yu-I, Chen Yen-Chun. The study on pneumatic transplanter(Ⅱ)—control on the positioning for movement [J]. Journal of Agricultural Machinery, 1998, 7(3): 75–84. (in Chinese)
- 26 呂英石,李新濤,陳昱,等. 可調整式花卉穴盤苗假植機構之研究[J]. 農業機械學刊,2003,12(1):11–24.
Lu Ying-Shin, Lee Hsin-tao, Chen Yu, et al. The development of adjustable transplanting mechanism for plug seedlings [J]. Journal of Agricultural Machinery, 2003, 12(1): 11–24. (in Chinese)
- 27 胡敏娟. 穴盘苗自动移栽关键技术的研究[D]. 南京: 南京农业大学,2011.
Hu Minjuan. Research on the key technology for automatic plug seedling transplanting [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011. (in Chinese)
- 28 刘继展,李萍萍,蒋大林. 可动式螺旋立体花架系统的设计[J]. 中国农机化,2003(6):40–42.

Gripping Force Control Using Adaptive Neuro-fuzzy Inference Systems

Zhou Jun Yang Xiaorong Zhu Shuping

(Jiangsu Key Laboratory for Intelligent Agricultural Equipment , Nanjing Agricultural University , Nanjing 210031 , China)

Abstract: An intelligent controller using adaptive neuro-fuzzy inference system was developed to control the force of gripping fruits and vegetables of an agricultural robot. The inputs of the controller are the current gripping force and the detail coefficients of discrete wavelet transform of the signal from slipping sensor fixed on the robotic end effector. The output of the controller is the displacement of fingers of the end effector. Firstly, a subtractive clustering was applied to generate a fuzzy model, and the radius of the clustering was adjusted to optimize the fuzzy rules. Then methods of sampling training data were introduced, and a hybrid training algorithm consisting of the gradient descent and least square algorithms was implemented to tune antecedent parameters and consequent part of the model. Finally, the experiments of controlling the gripping force were carried out. It shows that the controller is able to adapt itself to differences of the fruits and vegetables in mass and surface friction characteristics. Moreover the controlling overshoot of gripping force is restrained successfully and less than 0.8N, which prevented the grasping of fruits and vegetables from mechanical destruction.

Key words: Agricultural robot Control of gripping force ANFIS Subtractive clustering

(上接第 53 页)

Design and Coordinated Motion Simulation of Transplanting Robot for Column Cultivation

Liu Jizhan¹ Liu Wei¹ Mao Hanping¹ Xi Ning² Li Pingping³

(1. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. Department of Electrical and Computer Engineering, Michigan State University, East Lansing 48824, USA

3. College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: A transplanting robot aiming at the new spiral culture column was developed. The electromagnet type and structure parameters of the double-needle electromagnet-driven end-effector were decided with geometrical and force-balance analyses. The coordinated motion simulations of plug tray seedling transplanting robot for column cultivation were carried out on a virtual prototype to find out the optimal structure parameters of the manipulator, the optimal layout of the system and the time sequence of coordinated motions of different components. And the flow diagram of coordinated motion was constructed. Tests of the real prototype indicate that the horizontal and vertical positioning errors of the manipulator are 2.24 and 0.63 mm, respectively, and the success rate of transplanting achieves 94.7%. The working efficiency of transplanting to columns no higher than 1.2 m achieves 750 hills per hour, and the seedling picking-up time is only 0.2 s, which can meet the practical requirements of automatic transplanting of column cultivation.

Key words: Column cultivation Transplant robot Coordinated motion Simulation