

基于贪心算法的温室钵苗稀植移栽路径优化

童俊华^{1,2} 蒋焕煜³ 武传宇^{1,2}

(1. 浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018; 2. 浙江省种植装备技术重点实验室, 杭州 310018;
3. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310058)

摘要: 温室育苗中,钵苗需从高密度穴盘向低密度穴盘移栽以获得生长空间。温室钵苗自动移栽机获取穴盘中钵苗健康信息并对健康钵苗进行稀植移栽,代替传统人工作业,且效率高、质量好。钵苗稀植移栽路径包括移栽机末端执行器从原点出发,将高密度盘内的健康钵苗逐一抓取移栽至低密度盘,直到完成回到出发点。钵苗取栽位置的先后秩序决定了稀植路径的长短,遍历搜索算法规划路径计算量巨大,无法满足移栽实时性要求。本文基于贪心算法对常规的4种固定顺序路径规划方案分别优化,共组成8种路径规划方案,分别对稀疏和密集穴盘稀植路径进行规划,比较分析优化算法的有效性。结果表明按列扫描的2种贪心优化方案比固定顺序方案要优,规划路径长度与穴盘缺苗数量成正比趋势。最优化方案 GAS3 对密集穴盘稀植规划路径,相比固定顺序方案的优化幅度达 10.6%,算法平均耗时 0.84 s。穴盘缺苗数对路径缩短优化效果有显著影响,缺苗数增加后优化幅度有所降低。贪心优化方案使稀植移栽路径得到优化,也满足作业实时性要求,提高了钵苗移栽效率。

关键词: 温室; 穴盘苗; 稀植移栽; 路径优化; 贪心算法

中图分类号: S24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)03-0008-06

Optimization of Seedlings Lower Density Transplanting Path Based on Greedy Algorithm

Tong Junhua^{1,2} Jiang Huanyu³ Wu Chuanyu^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China
2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Transplanting Equipment and Technology, Hangzhou 310018, China
3. College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Seedlings need to be transplanted from high density into lower density trays for more space to grow in the greenhouse. Automatic transplanter could detect seedlings health state and do the tasks of lower density transplanting. It can work in high efficiency and good quality comparing with the traditional manual work. The lower density transplanting path includes end-effector leaving from original point, grasping health seedlings from high density to lower density trays one by one, and going back to the start at last. The distances of transplanting path were decided by seedlings grasping order. Traversing search algorithm consumed large calculation to plan this transplanting path which does not meet the real time requirement. In this paper, four schemes of fixed sequences were optimized by using the greedy algorithm separately, and eight schemes were formed totally. The path planning methods were used in the sparse and dense trays to verify the effectiveness of the greedy algorithm scheme. Comparing with the longest mean value of fixed sequence schemes for high density trays path planning, optimal scheme of GAS3 could get a better result with more than 10.6% amplitude optimization. The average calculation time of

收稿日期: 2015-07-22 修回日期: 2015-11-26
基金项目: 国家自然科学基金项目(51275457)、浙江省自然科学基金项目(LQ16E050006)、浙江理工大学科研启动基金项目(14022211-Y)、
机械工程浙江省高校重中之重学科和浙江理工大学重点实验室优秀青年人才培养基金项目(ZSTUME01B11)和杭州市科技发展计划项目(20140432B15)
作者简介: 童俊华(1984—),男,讲师,博士,主要从事农业装备智能化技术研究,E-mail: jhtong@zstu.edu.cn
通信作者: 武传宇(1976—),男,教授,博士生导师,主要从事智能农业装备研究,E-mail: cywu@zstu.edu.cn

the optimization scheme was 0.84 s. Significance test showed the increase of vacancy holes reduced the effectiveness of length shorten. As a whole, the greedy algorithm scheme optimizes the lower density transplanting path, meets the real-time work requirement, and improves the transplanting work efficiency.

Key words: greenhouses; seedlings; lower density transplanting; path optimization; greedy algorithm

引言

温室钵苗自动移栽机^[1-2]基于机器视觉和末端执行器实现对穴盘中的钵苗健康状况检测和夹持移栽,降低传统人工作业的劳动强度,且效率高、质量好。国外从 20 世纪 80 年代末^[3]开始研究该技术,TING 等^[4]基于 SCARA 四自由度工业机器人开发钵苗机进行 600 孔和 48 孔苗盘移栽试验;RYU 等^[1]开发一套专用钵苗移栽机,通过 CCD 检测钵苗有无,末端执行器夹持成功率可达 96%。近年国内对温室钵苗自动移栽技术进行了研究^[5-7],也将利于钵苗后期的大田机械标准化移栽作业^[8-10]。

移栽机设计规划的控制策略影响其工作效率。HU 等^[11]通过运动学和动力学仿真,优化二自由度五杆并联机构几何尺寸和抓取苗轨迹中的驱动速度,为高速移栽机设计提供依据。自动移栽机单末端执行器在供苗盘和目的穴盘间往复取栽苗,进行劣质苗穴补种和稀植移栽作业,路径具有多选择性。笔者前期研究^[12]通过遗传算法对成苗率在 80% ~ 95% 之间的目的穴盘进行补苗路径优化,类似于旅行商组合优化问题(TSP)^[13],相比固定顺序移栽行走距离缩短。但在稀植移栽作业中,低密度的目的穴盘为空盘,若采用遗传算法规划,生成的整条路径编码长,计算量大,耗时长,将无法满 足移栽机实时性作业的要求。

本文基于贪心算法^[14]逐步取优思想,对常规的 4 种固定顺序稀植移栽路径分别优化,通过典型算例,对比分析贪心算法缩短末端执行器行走距离的有效性。

1 钵苗稀植移栽路径规划描述

1.1 温室钵苗自动移栽机工作原理

采用独立专用的机电移栽系统,是目前较通用的温室钵苗自动移栽机型。图 1 为综合机器视觉和直角坐标型移动平台设计的移栽机,其包括:苗盘输送、钵苗健康识别、上下位机控制和末端执行器移栽 4 个单元。

移栽机通过机器视觉检测钵苗^[15],获得穴盘对应孔位的健康状况信息,随后苗盘输送单元将穴盘送至末端执行器移栽单元的固定位置。当自动移

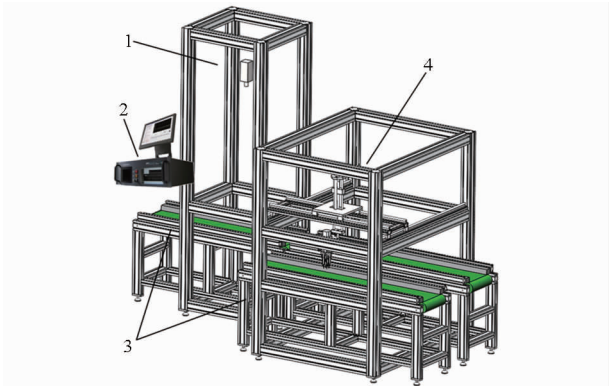


图 1 温室钵苗自动移栽机结构简图
Fig. 1 Automated seedling transplanter in greenhouses
1. 钵苗健康识别单元 2. 上下位机控制单元
3. 苗盘输送单元 4. 末端执行器移栽单元

栽机执行劣质苗剔除和穴孔补种作业时,与被检测苗盘相平行位置的输送带上备有补种的健康钵苗,末端执行器在驱动臂带动下执行空穴补种移栽作业。当自动移栽机执行本文所讨论的单末端执行器稀植移栽作业时,机器视觉所检测的苗盘为高密度供苗穴盘,在末端执行器移栽单元内并行输送苗盘为空穴孔低密度目的穴盘;上下位机控制单元在获知供苗盘内钵苗健康信息后,控制伺服电动机驱动 X、Y、Z 三自由度直角坐标机械臂(图 2),带动末端执行器精确定位至健康钵苗孔位,逐一地稀植移栽至目的穴盘各空穴孔内。

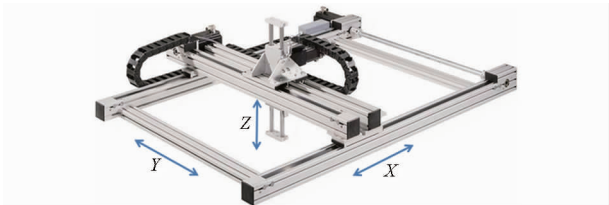


图 2 三自由度直角坐标机械臂
Fig. 2 Robotic arm with 3-DOF rectangular coordinates

1.2 稀植移栽路径规划分析

育苗盘的外围尺寸统一为 250 mm × 500 mm,常用穴孔 G 包含有 32、50、72、128 孔规格。图 3 为一个 50 孔规格供苗穴盘向 32 孔目的穴盘稀植移栽路径示意图:供苗穴盘为经机器视觉检测过的高密度穴盘苗,穴盘内小圆圈代表健康钵苗,空穴表示劣质钵苗或未发芽、漏播孔位;目的穴盘为低密度待稀植的空穴盘;上下位机控制单元通过前期检测和尺寸

计算记录两穴盘各穴孔有无苗的位置信息。确定从供苗穴盘中抓取健康钵苗稀植移栽入目的穴盘中各空穴孔的先后秩序,即为钵苗稀植移栽路径的规划。

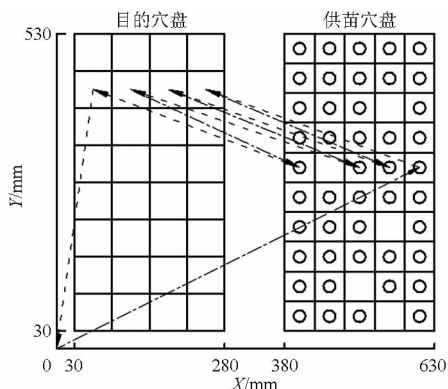


图3 穴盘苗稀植移栽路径示意图

Fig.3 Schematic diagram of seedlings lower density transplanting path

在稀植移栽作业中,目的穴盘有 G_1 个穴孔、供苗穴盘有 G_2 个穴孔,穴盘外围尺寸和各穴孔在末端执行器移栽单元直角坐标系中的位置都是固定值,原点及各穴孔间距离均可计算获得。假设供苗穴盘内随机位置健康钵苗 m 株(其中 $m \geq G_1$),则驱动机械臂及末端执行器进行稀植移栽作业可供选择的途径有 $\frac{m! G_1!}{(m - G_1)!}$ 种。机械臂移栽满目的穴盘的行走距离因路径不同而不同,行走速度相同情况下,距离越短则稀植移栽效率越高,因此寻找短行走距离的路径是该移栽路径规划的优化目标。

遍历搜索算法是通过比较排列组合所有可能的路径长度,寻找最短路径方案较容易想到的方法。但是求解每条移栽路径长度包括计算原点及各穴孔间距离,计算机运算量巨大、处理时间长,无法满足钵苗稀植移栽作业实时控制的操作要求。

固定顺序法是控制供苗穴盘各穴孔钵苗按固定的顺序稀植移栽至目的穴盘的各穴孔内,无需对路径长度进行比较计算,可满足作业实时性的控制要求。但若对该固定顺序规划路径进行优化,移栽机的工作效率还将有更大提升空间;基于对当前穴孔移栽路径取最短的思想,本文引入贪心算法对固定顺序法进行优化。

2 固定顺序和贪心优化路径规划方案

2.1 4种固定顺序稀植移栽路径规划方案

基于稀植移栽路径规划模型(图3),常规的4种固定顺序路径规划方案描述如下。

方案1(FS1):按从左至右、从上至下顺序扫描供苗穴盘,依次将各穴孔钵苗按同样的秩序移栽至目的穴盘,如图4a所示。

方案2(FS2):按从左至右、从上至下顺序扫描供苗穴盘,依次将各穴孔钵苗按从右至左、从上至下的顺序移栽至目的穴盘,如图4b所示。

方案3(FS3):按从上至下、从左至右顺序扫描供苗穴盘,依次将各穴孔钵苗按从上至下、从右至左的顺序移栽至目的穴盘,如图4c所示。

方案4(FS4):按从上至下、从左至右顺序扫描供苗穴盘,依次将各穴孔钵苗按从上至下、从左至右的顺序移栽至目的穴盘,如图4d所示。

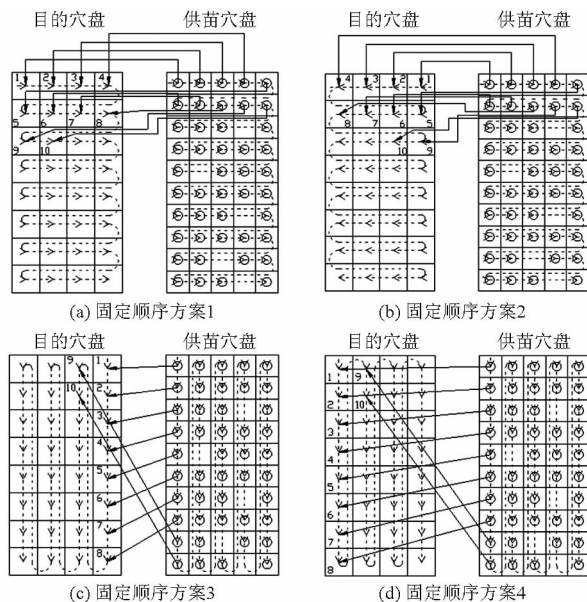


图4 4种固定顺序方案

Fig.4 Four schemes of fixed sequence

2.2 基于贪心算法的4种路径优化方案

贪心算法并不以整体最优为考虑目标,其所做选择只是在某种意义的局部最优的选择;希望通过每一次所做的贪心选择,使得最终结果成为最优解的很好近似。

贪心算法具体应用到穴盘苗稀植移栽的固定顺序优化中,方法可描述为:① 保持当前各固定顺序方案扫描目的穴盘顺序不变。② 选择供苗穴盘移栽钵苗时,则以当前和目的穴盘空穴孔距离最近的钵苗为移栽对象。令 i 为填充穴孔序号(其中 $i \leq G_1$), j 代表供苗穴盘有苗穴孔序号(其中 $j \leq m$), d_{ij} 代表两穴孔间距离,则贪心选择移栽钵苗的目标为: $\min d_{ij}$;移栽满整个目的穴盘的总路径长为: $D = \sum_{i=1}^{G_1} \min d_{ij}$;执行该优化算法所需计算穴孔间路径长度和比较运算的次数为 $T = G_1(2m - G_1 + 1)/2$ 。

如图4a,基于固定顺序方案1进行贪心优化,保持目的穴盘从左至右、从上至下的扫描移栽顺序;比较供苗穴盘内健康钵苗所有穴孔与目的穴盘1号穴孔间距离,最短的穴孔为移栽对象;依照此方法对

未完成填充的目的穴盘空穴孔进行依序扫描稀植移栽作业。在此 $m = 45, G_1 = 32$, 则算法的比较运算次数 $T = 944$; 可见计算机控制单元能快速规划出优化路径, 满足移栽机实时性作业的要求。

如图 5, 采用贪心优化方案对图 4 所示 4 种固定顺序方案分别进行优化, 其中, 贪心优化方案 1、2、3、4 (GAS1、GAS2、GAS3、GAS4) 分别与固定顺序方案 1、2、3、4 (FS1、FS2、FS3、FS4) 对应。

3 固定顺序和贪心优化方案规划比较

为评价上述 8 种稀植移栽路径规划方案优劣性, 分别对稀疏穴盘 (目的穴盘 32 孔、供苗穴盘 50 孔规格) 和密集穴盘 (目的穴盘 72 孔、供苗穴盘 128 孔规格) 进行稀植路径规划比较。稀植移栽作业模型如图 3 所示, 其中, 供苗穴盘的随机缺苗数在 5% ~ 20% 之间^[11]。

3.1 稀疏穴盘稀植移栽路径规划比较

(1) 穴盘缺苗数为 5 的规划比较

图 3 所示为 50 孔供苗穴盘向 32 孔目的穴盘稀

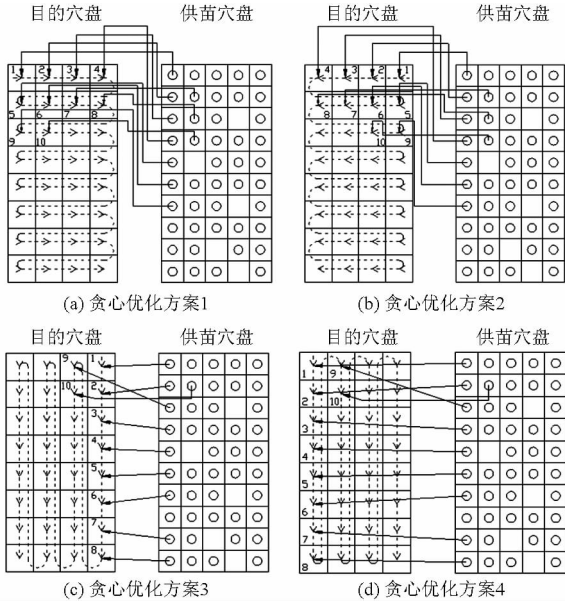


图 5 4 种贪心优化方案

Fig. 5 Four schemes of greedy algorithm

植作业模型, 随机生成 10 个缺苗数为 5 的供苗穴盘样本, 分别用上述 8 种方案进行路径规划比较, 结果如表 1 所示。

表 1 8 种方案对供苗穴盘缺苗数为 5 的移栽路径规划的长度比较

Tab. 1 Transplanting path planning using eight strategies with five vacancy holes in providing tray mm

样本序号	方案								L
	FS1	FS2	FS3	FS4	GAS1	GAS2	GAS3	GAS4	
1	23 191	22 878	22 458	23 446 * *	23 246	23 207	21 989 *	22 241	1 583
2	23 344	23 044	22 728	23 562 * *	23 172	22 907	21 750 *	21 984	1 605
3	23 687 * *	23 375	22 996	23 296	23 494	23 280	22 126 *	22 284	1 712
4	23 388	23 118	23 383	24 147 * *	23 277	22 965	21 609 *	21 825	1 947
5	24 121 * *	23 853	22 754	23 310	23 546	23 147	21 754 *	21 972	2 202
6	23 194	22 880	23 042	23 948 * *	22 887	22 522	21 461 *	21 691	1 969
7	23 486	23 201	23 021	23 568 * *	23 481	23 020	21 654 *	21 867	2 027
8	23 353	23 052	22 805	23 628 * *	23 011	22 717	21 781 *	22 019	1 930
9	24 166 * *	23 879	22 401	22 926	23 620	23 369	22 084 *	22 253	2 157
10	23 299	23 001	23 241	24 226 * *	22 958	22 663	21 656 *	21 955	2 193
平均长度	23 523	23 228	22 883	23 606 * *	23 269	22 980	21 787 *	22 009	1 819
标准偏差	356	366	315	404 * *	267	280	215	196 *	

注: * * 表示该样本数据组最大值, * 表示该样本数据组最小值, L 为最大值与最小值之差。

对比可知, 4 种贪心优化方案所规划路径平均长度分别比其相对应的 4 种固定顺序方案的平均长度要小; 固定顺序方案中 FS1 和 FS4 的各样本路径和平均长度呈现出在该组数据中最大值; 目的穴盘按列扫描的贪心优化方案 GAS3 的各样本路径和平均长度在该组数据中最小; 按列扫描的贪心优化方案 GAS3 和 GAS4 对 10 个随机样本规划路径长度数组的标准偏差相对要小, 说明规划方案的性能稳定; 与固定顺序方案的最大平均路径值相比较, 方案 GAS3 的规划缩短 1 819 mm。

(2) 穴盘缺苗数为 3 ~ 10 的规划比较

同样以图 3 所示 50 孔供苗穴盘向 32 孔目的穴

盘稀植作业为模型, 随机生成 8 组缺苗数为 3 ~ 10 的供苗穴盘, 各组为 10 个样本, 统计比较 8 种路径规划方案每组样本的长度均值, 结果如图 6 所示。

对比可知, 按行扫描的固定顺序方案 FS1 和 FS2 随不同缺苗数穴盘规划路径长度变化不大, 分析原因是由于穴盘宽度小, 缺苗对下一株取苗移植距离影响小; 其路径长度均值在所有规划方案中相对较大。对应的贪心优化方案 GAS1 和 GAS2 在缺苗数小于 6 时, 路径缩短优化效果明显, 大于 6 时无效果。

按列扫描的固定顺序方案 FS3 和 FS4 随不同缺苗数穴盘规划路径长度变化波动大, 分析原因是穴

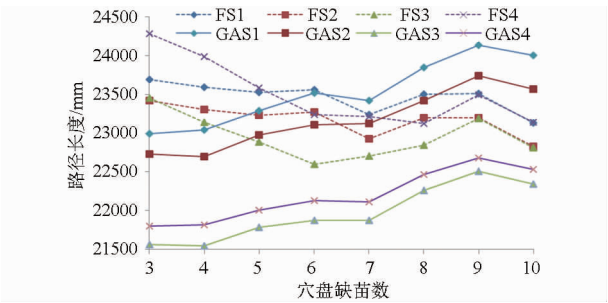


图 6 稀疏穴盘的 8 种路径规划方案比较

Fig. 6 Comparison of eight schemes for sparse tray

盘长度大,缺苗导致顺序移苗的位置变动大;其中 FS3 的路径均值比另外 3 种固定顺序方案要小。对应的贪心优化方案 GAS3 和 GAS4 路径缩短的效果明显。

4 种贪心优化方案所规划路径长度均与穴盘缺苗数成正比趋势,末端执行器正是由于缺苗才需行走至更远处进行取苗移栽,说明了贪心优化方案科学合理性。方案 GAS3 在所有不同缺苗情况时,路径规划均值最小,在 8 种方案中最优。

3.2 密集穴盘稀植移栽路径规划比较

为进一步验证规划算法的有效性,以 128 孔供苗穴盘向 72 孔目的穴盘稀植作业为模型,随机生成 21 组缺苗数为 6 ~ 26 的供苗穴盘,各组为 10 个样本,统计比较 8 种路径规划方案每组样本的长度均值,结果如图 7 所示。

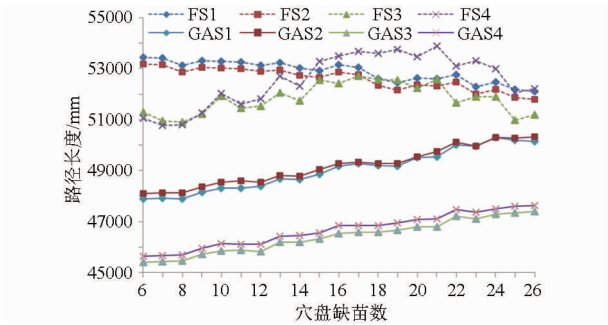


图 7 密集穴盘的 8 种路径规划方案比较

Fig. 7 Comparison of eight schemes for dense tray

对比可知,8 种路径规划方案所呈现规律基本和低密度穴盘稀植移栽路径变化一致。由于总的移栽钵苗数量增加,使各方案规划路径长短优劣性更加明显;其中,最优方案 GAS3 对不同缺苗数穴盘规划路径与固定顺序方案中最大路径值相比较,优化幅度在 10.6% ~ 15% 之间,平均最少缩短 5.7 m,末端执行器行程缩短明显。计算机运行贪心优化方案的平均耗时为 0.84 s,满足钵苗自动移栽机实时性的作业要求。图 8 为方案 GAS3 对某一缺苗数为 24 的供苗穴盘进行稀植移栽路径规划示例。

为明确穴盘缺苗数对贪心算法规划路径缩短优化效果的影响,对该密集穴盘移栽缺苗数为 6 ~ 26

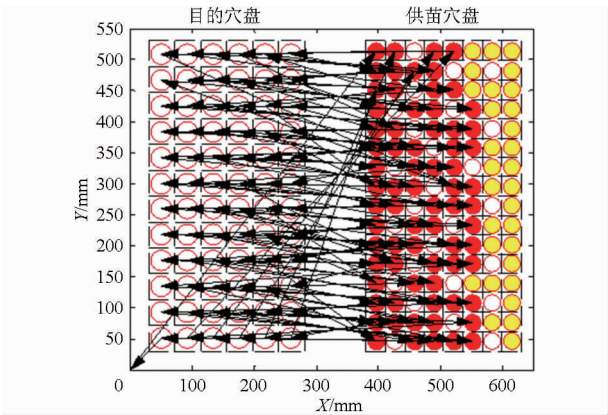


图 8 方案 GAS3 的稀植移栽规划示例

Fig. 8 Example of seedlings lower density transplanting path planning by scheme GAS3

的 210 个样本优化幅度值进行单因素方差分析和显著性检验 ($F_{0.05}$ 检验),以及 SNK 检验,结果如表 2 和表 3 所示。

表 2 单因素方差分析和显著性检验结果

Tab. 2 Results of variance analysis and significance test

差异源	平方和	自由度	均方	<i>F</i> 值	显著性
不同缺苗组间	0. 029	20	0. 001	7. 228	0. 000
相同缺苗组内	0. 038	189	0. 000		
总和	0. 067	209			

表 3 不同空穴缺苗数下优化幅度的 SNK 检验结果

Tab. 3 SNK test for optimization range with different vacancy holes

缺苗数	优化幅度	缺苗数	优化幅度	缺苗数	优化幅度
6	0. 150 ± 0. 004 ^a	13	0. 136 ± 0. 005 ^{abc}	20	0. 129 ± 0. 019 ^{abc}
	0. 149 ± 0. 004 ^a		0. 131 ± 0. 004 ^{abc}		0. 134 ± 0. 017 ^{abc}
7	0. 144 ± 0. 005 ^a	14	0. 136 ± 0. 014 ^{abc}	21	0. 118 ± 0. 013 ^{cd}
	0. 142 ± 0. 004 ^a		0. 133 ± 0. 011 ^{abc}		0. 118 ± 0. 020 ^{cd}
8	0. 140 ± 0. 004 ^{ab}	15	0. 133 ± 0. 017 ^{abc}	22	0. 121 ± 0. 022 ^{bcd}
	0. 139 ± 0. 006 ^{ab}		0. 133 ± 0. 016 ^{abc}		0. 108 ± 0. 021 ^d
9	0. 139 ± 0. 009 ^{ab}	16	0. 133 ± 0. 018 ^{abc}	23	0. 106 ± 0. 026 ^d
	0. 139 ± 0. 009 ^{ab}		0. 133 ± 0. 018 ^{abc}		

注:列中标准偏差值上标不同的字母表示有显著差异。

由表 2 的显著性分析可知:穴盘缺苗数对贪心优化方案的路径缩短优化效果有显著影响;通过表 3 的 SNK 分析知,缺苗数 22 ~ 26 相比 6 ~ 21 区间的优化幅度有所降低。稀植移栽中,供苗穴盘与目的穴盘对应行(或列)苗数量不对称,导致多出苗需移栽至下一行(或列),增加了移栽距离。穴盘内缺苗数的增加,可减少该种情形,使移栽路径减少;相对的,贪心优化方案所规划路径的缩短幅度有所

降低。

为检验贪心算法提高移栽机稀植移栽效率的有效性,对密集穴盘移栽缺苗数为6~26的210个样本按最优方案GAS3和固定顺序方案最大路径进行作业时间比较。当移栽机X、Y轴伺服最大驱动速度为0.8 m/s时,贪心算法对不同缺苗数供苗穴盘的作业平均缩短时间为5.7~8.1 s,且缩短时间随着缺苗数的增加而减少。样机试验与仿真分析结果相对应,该路径优化算法可提高移栽机工作效率。

4 结论

基于贪心算法对温室穴盘间钵苗稀植移栽的4种常规固定顺序路径规划方案分别进行优化,结果为:

(1) 按列扫描的固定顺序方案规划路径具有随

穴盘缺苗数变化而波动现象,而贪心优化方案规划路径长度均随穴盘缺苗数增加成正比趋势。

(2) 在8种路径规划方案中,按列扫描的贪心优化方案所得规划路径长度相对要小,其中方案GAS3最优,对不同缺苗穴盘的规划路径长度均最小。

(3) 对密集穴盘的稀植规划中,最优化方案GAS3与固定顺序方案规划路径最大值相比,优化幅度在10.6%~15%之间,即平均路径均值最少缩短5.7 m,移栽效率明显提高。

(4) 穴盘缺苗数对贪心优化方案缩短移栽路径的优化效果有显著影响,缺苗数量增加后优化幅度有所降低。

(5) 贪心优化方案的平均耗时为0.84 s,可快速得到整体稀植移栽优化路径,满足作业实时性要求。

参 考 文 献

- 1 RYU K H, KIM G, TING K C. Development of a robotic transplanter for bedding plants[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2001, 78(2):141-146.
- 2 蒋焕煜,施经挥,任烨,等. 机器视觉在幼苗自动移钵作业中的应用[J]. 农业工程学报,2009,25(5):127-131.
JIANG Huanyu, SHI Jinghui, REN Ye, et al. Application of machine vision on automatic seedling transplanting[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(5):127-131. (in Chinese)
- 3 KUTZ K C, MILES G A, HAMMER P A, et al. Robotic transplanting of bedding plants[J]. Transactions of the ASAE, 1987, 30(3):586-590.
- 4 TING K C, GIACOMELLI G A, SHEN S J, et al. Robot work cell for transplanting of seedlings. Part I: layout and materials flow [J]. Transactions of the ASAE, 1990, 33(3):1005-1010.
- 5 孙国祥,汪小岳,何国敏,等. 穴盘苗移栽机末端执行器设计与虚拟样机分析[J]. 农业机械学报,2010,41(10):48-53.
SUN Guoxiang, WANG Xiaochan, HE Guomin, et al. Design of the end-effector for plug seedlings transplanter and analysis on virtual prototype[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10):48-53. (in Chinese)
- 6 韩绿化,毛罕平,胡建平,等. 穴盘苗自动移栽钵体力学特性试验[J]. 农业工程学报,2013,29(2):24-29.
HAN Lvhu, MAO Hanping, HU Jianping, et al. Experiment on mechanical property of seedling pot for automatic transplanter [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(2):24-29. (in Chinese)
- 7 韩绿化,毛罕平,严蕾,等. 穴盘育苗移栽机两指四针钳夹式取苗末端执行器[J]. 农业机械学报,2015,46(7):23-30.
HAN Lvhu, MAO Hanping, YAN Lei, et al. Princette-type end-effector using two fingers and four pins for picking up seedlings [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7):23-30. (in Chinese)
- 8 叶秉良,李丽,俞高红,等. 蔬菜钵苗旋转式取苗机构动力学分析与试验[J]. 农业机械学报,2014,45(6):70-78.
YE Bingliang, LI Li, YU Gaohong, et al. Dynamics analysis and test of rotary pick-up mechanism for vegetable pot-seedling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6):70-78. (in Chinese)
- 9 陈建能,章鹏华,王英,等. 旋转式钵苗栽植机构多目标参数优化与试验[J]. 农业机械学报,2015,46(5):46-53.
CHEN Jianneng, ZHANG Penghua, WANG Ying, et al. Multi-objective parameter optimization and experiment of rotary seedling planting mechanism [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5):46-53. (in Chinese)
- 10 金鑫,杜新武,耿贵胜,等. 2ZDJ-2 型钵苗移栽机栽植系统试验[J]. 农业机械学报,2015,46(12):26-31.
JIN Xin, DU Xinwu, GENG Guisheng, et al. Experiment on planting system of 2ZDJ-2 transplanter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12):26-31. (in Chinese)
- 11 HU Jianping, YAN Xiaoyue, MA Jun, et al. Dimensional synthesis and kinematics simulation of a high-speed plug seedling transplanting robot[J]. Computer and Electronics in Agriculture, 2014, 107:64-72.
- 12 童俊华,蒋焕煜,周鸣川. 基于遗传算法的穴盘苗自动移钵路径优化[J]. 农业机械学报,2013,44(4):45-49, 26.
TONG Junhua, JIANG Huanyu, ZHOU Mingchuan. Optimization of seedling transplanting path based on genetic algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4):45-49, 26. (in Chinese)
- 13 孙慧平,李健,郭伟刚. 遗传算法在束流切割路径优化中的应用[J]. 农业机械学报,2008,39(9):158-160.
SUN Huiping, LI Jian, GUO Weigang. Application of genetic algorithm on optimization of high power beam cutting paths [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(9):158-160. (in Chinese)
- 14 KARABULUT K, TASGETIREN M F. A variable iterated greedy algorithm for the traveling salesman problem with time windows [J]. Information Sciences, 2014, 279:383-395.
- 15 TONG J H, LI J B, JIANG H Y. Machine vision techniques for seedlings quality evaluation based on leaf area [J]. Biosystems Engineering, 2013, 115(3):369-379.