

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.04.008

基于遗传算法的穴盘苗自动移钵路径优化*

童俊华¹ 蒋焕煜^{1,2} 周鸣川¹

(1. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310058; 2. 农业部设施农业装备与信息化重点实验室, 杭州 310058)

摘要: 设施农业钵苗培育中,穴盘里不健康钵苗剔除后进行补种作业是一个重要环节。自动移钵路径是指末端执行器自原点出发,从移栽穴盘中逐一抓取健康钵苗补种到目的穴盘,直到完成回到出发点。该移钵路径问题与旅行商问题(TSP)具相似性,目标函数均为总路径长度,但其约束条件也具有特殊性。基于遗传算法提出了一套适合求解移钵路径优化问题的模型算法,并对算法的有效性进行了典型算例分析。模拟结果表明该算法得到的优化路径长度较常规采用的固定顺序路径长度要优,移栽完50株钵苗优化幅度8.5%以上,路径缩短3.7m以上,平均运算时间0.65s。算法使得移钵路径得到了优化,且满足移钵机器人实时性要求,移栽效率进一步得到了提高。

关键词: 穴盘苗 自动移钵 路径优化 遗传算法

中图分类号: S24 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2013)04-0045-05

Optimization of Seedling Transplanting Path Based on Genetic Algorithm

Tong Junhua¹ Jiang Huanyu^{1,2} Zhou Mingchuan¹

(1. School of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China 2. Key Laboratory of Equipment and Informatization in Environment Controlled Agriculture, Ministry of Agriculture, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Healthy seedlings need to be transplanted into vacancy cells in tray instead of unhealthy ones. It is an important step of seedling tray cultivation in the facility agriculture. The end-effector leaved the origin, and grasped the health seedlings one by one from the transplanting tray to the aim tray. And then it was back to the origin until the all vacancy cells has been filled. This process formed the automatic transplanting path. The seedling transplanting path problem was similar to traveling salesman problem which the whole path length was objective function. A method was developed for optimization of seedling transplanting path based on genetic algorithm. The effectiveness of the algorithm was analyzed by experiment. The numerical simulated results showed that compared with the fixed sequential method, the path planned by genetic algorithm was shortened by 3.7 m for transplanting fifty seedlings. The algorithm's average operation time was 0.65 s. The transplanting path was optimized, and operation time meets the transplanting robot's real-time requirement. The work efficiency of transplanting was improved.

Key words: Seedling Automatic seedling transplanting Path optimization Genetic algorithm

引言

工厂化穴盘育苗中成苗率在80%~95%之间^[1],穴盘内除未发芽和漏播的孔穴,还有劣质钵

苗,导致后续机械化批量移栽出现栽空、漏栽等现象,因此穴盘苗出厂前需要有不健康苗剔除和补苗环节。设施农业钵苗移栽机器人^[2-3]通过视觉检测钵苗健康状况和移钵系统实现各种功能的移栽,代

收稿日期: 2012-09-27 修回日期: 2012-11-14

* 国家自然科学基金资助项目(51275457)、农业部引进国际先进农业科学技术资助项目(2011-G32)、高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20110101110086)、教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-10-0689)和浙江省“新世纪151人才工程”资助项目

作者简介: 童俊华, 博士生, 主要从事农业装备智能化技术研究, E-mail: jhtong1010@gmail.com

通讯作者: 蒋焕煜, 教授, 博士生导师, 主要从事农业装备智能化技术与机器人研究, E-mail: hyjiang@zju.edu.cn

替传统手工移栽,降低劳动强度,提高生产效率,且使秧苗移栽一致性好。该技术目前在国内没有得到大的推广,但人们对此产生的经济效益有了新的认识,育苗移钵机械的发展再次引起重视。近几年国内学者对温室内的钵苗移栽机器人技术开始关注并深入研究^[4-6]。

穴盘苗进入钵苗移栽机器人^[7]的补苗移栽系统,末端执行器从移栽穴盘将健康钵苗取出逐一补种到经视觉检测不健康钵苗剔除的目的穴盘空穴中去。目的穴盘内各空穴位置的随机性和移栽穴盘内可移栽钵苗的多选择性,致使移钵路径距离会随补种苗钵的先后顺序不同而变化。优化移钵路径使末端执行器行走距离减少,提高移钵工作效率。该组合优化问题类似于旅行商问题(TSP)^[8],也是一个NP完全问题,求解会随着问题规模扩大而导致求解时间急剧增长。较多研究基于遗传算法求解经典TSP问题,得到较好的寻优结果^[9-10]。

本文基于遗传算法求解TSP问题的思路,提出一个钵苗移栽路径组合优化算法模型,并给出典型算例,以说明该算法模型的有效性。

1 移钵路径规划描述

1.1 移钵作业工作原理

设施农业钵苗自动化移钵设备样机主要由穴盘苗输送系统、机器视觉识别系统、控制系统和移钵系统4个系统组成,如图1所示。

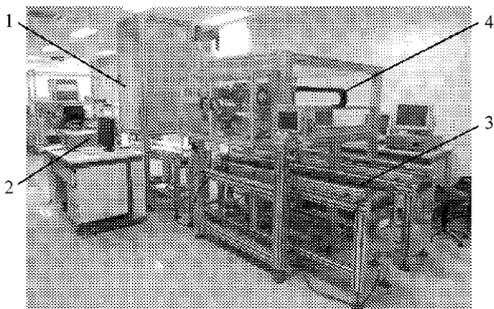


图1 设施农业钵苗自动化移钵设备样机

Fig.1 Robotic transplanter for seedlings in plug tray in greenhouses

1. 视觉识别系统 2. 控制系统 3. 穴盘苗输送系统 4. 移钵系统

育苗中常用的穴盘外围尺寸通常是250 mm × 500 mm,规格以G(其中G=50、72、128、200)穴孔定义。工厂化育苗作业中,通常是对同种规格穴盘苗批量进行统一生产和管理,提高工作效率。对穴盘G个穴孔进行固定顺序编号,则各编号穴孔对应应在穴盘内的相对位置尺寸是确定的。自动移钵机的机器视觉系统检测穴盘苗生长状况时,将各钵苗的健康信息与对应穴孔编号一起记录下来传给控制系

统;控制系统根据记录信息推算出传送到移钵系统中穴盘苗的各钵苗的相对位置,并驱动带有末端执行器的机械臂到达各不健康钵苗位置点进行剔除作业;最后控制系统再驱动机械臂和末端执行器进行将穴盘内各空穴补种上健康钵苗的移钵作业。通过上面的作业,保证了穴盘苗出厂前钵苗健康一致。

移钵系统中使用直角坐标型机械臂,以单维直线运动单位为基础,搭建X、Y、Z空间3自由度运动机构,采用伺服驱动,定位精度高,机构简图如图2所示。在三维空间内,机械臂可带动末端执行器达到空间任意点进行抓放苗的作业。

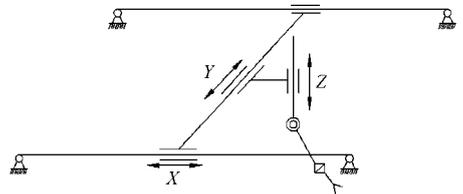


图2 直角坐标型机械臂机构简图

Fig.2 Schematic diagram of mechanical arm with rectangular coordinates

每个穴盘需要补种健康钵苗空穴位置和对应可供补种钵苗的位置都是随机的,因此健康钵苗补种的移钵作业路径针对每个穴盘都需要进行实时规划。图3是一个50穴孔规格穴盘移钵作业工作示意:目的穴盘是经机器视觉检测过的穴盘苗,穴盘中小圆圈表示健康钵苗,空穴表示不健康钵苗剔除后需要补种钵苗的位置点;移栽穴盘装满健康钵苗供目的穴盘补种,空穴代表前期补苗作业移栽完后的位置点;两穴盘内钵苗的随机位置信息经视觉检测后均输入控制系统。移钵路径规划即为移栽穴盘中健康钵苗被抓取和目的穴盘中空穴被补种先后顺序确定的规划问题。

目前工程上解决的移钵路径规划方法是对移栽穴盘按固定顺序扫描,将钵苗顺序的移入目的穴盘中,而不做多路径的比较选择。本文采用移栽穴盘

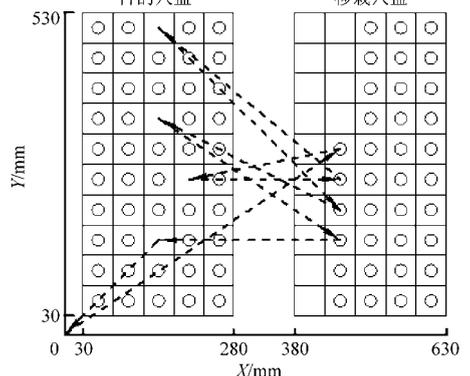


图3 健康钵苗补种移钵作业示意图

Fig.3 Schematic diagram of healthy seedling transplanting task

按从上往下、从左往右的顺序将钵苗移入目的穴盘从上往下、从右往左对应的空穴中去的方法。图3中带箭头折线为按固定秩序规划的一条移钵作业路径。机械臂带动末端执行器从原点出发到移栽穴盘,抓取一株健康钵苗移栽至目的穴盘的一个空穴点,再从目的穴盘返回至移栽穴盘抓取健康钵苗到下一个目标,反复这个过程直到目的穴盘的空穴填满,机械臂返回至原点。

1.2 移钵路径规划分析

在移栽作业的目的穴盘和移栽穴盘两穴盘规格为 G ,穴盘外围尺寸及穴盘处于移栽坐标系中位置都是固定值(如图3所示),在坐标原点及穴盘各穴孔间距离均可计算得到情况下,假设目的穴盘内需补种钵苗的随机位置空穴数量为 m 个(其中 $1 \leq m \leq G$),移栽穴盘内有可供移栽的随机位置健康钵苗 n 株(其中 $1 \leq n \leq G, m \leq n$)。在上述环境下,机械臂带动末端执行器进行移栽作业可选择的路径共有 $\frac{n! \times m!}{(n-m)!}$ 种,而不同路径的机械臂所需运动距离是不同的,距离越短移钵作业的工作效率则越高,因此找寻运动距离短的路径是优化移钵路径的目标。

寻找最短路径容易想到的方法是遍历算法,即利用排列组合的方法把所有的路径都列举并计算长度,逐一比较,选出长度最小的路径。在控制系统已从机器视觉系统获取了各钵苗坐标位置点的情况下,计算每一条路径需求 $m+1$ 个距离之和,计算出所有路径长度的计算量是 $\frac{(m+1)! \times n!}{(n-m)!}$,正比于 m 和 n 。假设 $m=4$ (穴盘苗成苗率80%~95%之间), $n=36$,则其计算量约为 10^8 次,加上路径长度比较运算,普通计算机的运行速度和内存无法满足移钵作业路径实时规划在线控制的要求,故遍历法无法运用于移钵路径的规划。

穴盘内各钵苗点类似于旅行商(TSP)问题中的城市位置,当然,移钵路径还具有更多约束条件。遗传算法^[11]求解TSP,能取得良好的优化效果,而在此基础上优化移钵路径则需进一步改进。末端执行器在两穴盘的苗钵间交叉穿行,且多选择性是在遗传算法中编码、交叉和变异操作中都需要转变的问题。

2 基于遗传算法移钵路径优化算法设计

2.1 遗传算法解移钵路径的优化模型

(1) 编码—染色体表示方式

穴盘钵苗在坐标系中的映射为一个坐标值 (x, y) ,根据遗传算法,对末端执行器行走穴孔路径进

行编码。目的穴盘中的 m 个待补苗空穴进行标记,依次为 $(-1, -2, \dots, -m)$;移栽穴盘中 n 株钵苗的穴孔依次标记为 $(1, 2, \dots, n)$,坐标系原点标记为 0 。采用直观的路径表示,将染色体定义为一个线性序列。假设 $m=4, n=36$,那么随机列举一条完整的路径编码为 $(0-20-3-16-1-9-2-36-4-0)$,可直接表示为 $(0\ 20\ -3\ 16\ -1\ 9\ -2\ 36\ -4\ 0)$;而位置点与点之间的距离则由各对应点的坐标,根据距离公式 $d(x, y) = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$ 求得。显然,编码的长度取决于目的穴盘中待补苗空穴的数量 m ,而编码染色体的总数同时取决于目的穴盘和移栽穴盘的标记总数 m 和 n 。遗传算法算子所需 N 数量的初始种群则通过两组随机序列交叉产生,即移栽穴盘里 n 个有穴孔标记产生的 $n!$ 随机序列取前 m 个元素与目的穴盘里 m 个空穴标记号产生的 $m!$ 随机序列元素相交叉,同时整个运算在 $n \geq m$ 条件下进行。

(2) 适应度函数

适应度函数值是评价一个染色体好坏的依据,与选择算法密切相关,会对实验结果造成直接的影响。而移钵路径优化目标函数为路径值最短,因此不能直接以总路径长作为适应度。考虑路径长度较长,直接应用其倒数作为适应度函数值,不同染色体对应函数值相差过大或过小不均一。这里令染色体 ξ 的适应度函数为 $f(\xi)$, D 表示路径总长度,在任一个种群的各路径长度中,必然存在最大值 D_{\max} 与最小值 D_{\min} ,考虑使总长度最短的路径适应性为 1 ,而最长路径适应性为 0 ,其他路径则介于 0 和 1 之间。得到适应度函数为

$$f(\xi) = 1 - \frac{D(\xi) - D_{\min}}{D_{\max} - D_{\min}}$$

2.2 遗传算子改进

遗传算子的选择、交叉和变异操作都直接影响遗传算法的效率和收敛速度,而移钵路径的约束条件在交叉和变异操作中的约束条件,需要对算法进行相应改进。

2.2.1 选择操作

采用轮盘赌选择法进行选择操作,适应度大的个体被选中的可能性也大。每个个体的适应度除以总适应度,以此作为每个个体的选择概率。以初始种群数为父代、种群选择比率 G_1 和个体的选择概率为选择依据,最终确定选择概率在前 NG_1 的染色体作为子代种群。

2.2.2 交叉操作

对初始种群选择操作完并随机排序后,进行交叉操作。通常使用的遗传算子包括一点交叉、两点

交叉、多点交叉和一致交叉。因移钵路径的染色体编码分别对应于2个穴盘内钵苗的不同标记,要求交叉后各位的基因值不能相同。考虑到该特殊性,本文提出了一种改进的交叉操作。

假设目的穴盘有4个等补苗空穴孔和移栽穴盘有36株健康苗穴孔,其补苗路径交叉算法描述如下:

(1)产生2个介于1至8之间的随机数*i*和*j*,其中*i*作为交配指示位,*j*作为交配步长。假设*i*=4,*j*=3,而父代个体 $A=(0\ 20\ -3\ 16\ -1\ 18\ -2\ 36\ -4\ 0)$; $B=(0\ 18\ -1\ 14\ -3\ 7\ -4\ 16\ -2\ 0)$ 。

(2)首先将2个个体除原点0后的第*i*+1位到*i*+*j*位互换,若*i*+*j*≥8,则视其均等于8。得到子代个体为 $A_1=(0\ 20\ -3\ 16\ -1\ 7\ -4\ 16\ -4\ 0)$; $B_1=(0\ 18\ -1\ 14\ -3\ 18\ -2\ 36\ -2\ 0)$ 。

(3)对每个个体前后的原点0位去除后,从前开始搜索,发现相同的基因用1000代替。于是得到 $A_2=(0\ 20\ -3\ 16\ -1\ 7\ -4\ 1000\ 1000\ 0)$; $B_2=(0\ 18\ -1\ 14\ -3\ 1000\ -2\ 36\ 1000\ 0)$ 。

(4)再对每个个体从除原点0后的第*i*+1位开始遍历,所有1000都依次被有效基因替换。具体方法是:若1000处于偶数位(即带负的标记),则将目的穴盘内的所有标记号与染色体除原点0后的每个偶数位遍历对比,如果是没有出现过的,则以此来代替1000;若1000处于奇数位(即带正的标记),则将移栽穴盘内的所有标记号与染色体除原点0后的每个奇数位对比,将没有出现过标记的归为一组,随机产生一个来代替1000。于是得到 $A_3=(0\ 20\ -3\ 16\ -1\ 7\ -4\ 25\ -2\ 0)$; $B_3=(0\ 18\ -1\ 14\ -3\ 8\ -2\ 36\ -4\ 0)$ 。

这种交叉算法在考虑继承父代信息同时,尽可能扩大随机化搜索的范围,并保证移钵路径染色体特有基因个体排序要求的有效性。

2.2.3 变异操作

变异操作使种群保证多样性,避免过早陷入局部最优解的问题。由于补苗路径编码的特殊性,为防止无效个体的出现,变异操作无法使用常规的单点基因值变异方法。

本文具体变异操作类似于上述交叉所用替换的方法,应用交叉操作中的假设对变异算法进行描述如下:

(1)产生一个介于1至8之间的随机数*k*代表变异位,将变异个体除原点0后的第*k*个标记值取出,判断该标记的正负特性。

(2)若标记位为负,则从除该标记数的其他负标记数中随机选择一个替换,再从变异个体中遍历

找到随机替换值与原变异基因位互换。假设*k*=2,父代个体 $A_3=(0\ 20\ -3\ 16\ -1\ 7\ -4\ 25\ -2\ 0)$,则在除-3标记数的(-1,-2,-3,-4)中产生一个随机数(设为-2),于是 $A_4=(0\ 20\ -2\ 16\ -1\ 7\ -4\ 25\ -3\ 0)$ 。

(3)若标记位为正,则从除该标记数的其他正标记数中随机选择一个与其进行基因替换,并遍历基因替换后的个体,若其中有同的基因,则用原标记数替换它,若无则满足了排序编码的特殊性要求。假设*k*=3,则在除16标记数的(1,2,⋯,36)中产生一个随机数(设为30),于是 $A_5=(0\ 20\ -3\ 30\ -1\ 7\ -4\ 25\ -2\ 0)$;若随机数为25,则 $A_5=(0\ 20\ -3\ 25\ -1\ 7\ -4\ 16\ -2\ 0)$ 。

2.2.4 重插入操作

初始种群经选择、重组和变异操作后,产生新的种群,而新种群个数比旧种群减少了 $N(1-G_1)$,为保持原始种群大小,进行重插入操作。以适应度为依据,重插入所有子代代替最不适宜的父个体,保持种群数*N*的规模。

2.2.5 算法终止条件

本文算例在找到最优个体前的许多代的种群适应度出现保持不变情况,设定一个明确的收敛性判别标准较困难,因此采用达到预先设定的代数和找到种群适应度最大个体为终止条件。

3 典型算例与结果分析

采用上面所述的遗传算法对移钵路径进行优化,遗传算子中选择、交叉和变异的概率分别取0.9、0.8和0.3,种群规模为40,优化代数为50。因穴盘规格的不同和标记穴孔数量的多少对算法的思想并没有直接的影响,现以图3所示钵苗健康状态及随机位置分布进行遗传算法模型优化。连续优化运算10次,遗传过程中种群路径长度均值和最优路径长度随代数的变化如图4所示。由图可知,遗传算法能在第25代左右得到收敛,其后即进入稳定区域。统计连续10次优化运算结果的平均值,种群第一代路径长度均值为3749 mm,优化后的最优路径长度均值为2930 mm,优化算法的路径缩短幅度为21.8%,取得了良好效果;同时,优化算法平均运行时间0.65 s,完全满足自动移钵机器人实时作业需求。

图5中箭头所示路径为经优化后的其中一条最优移钵路径解(05 -42 -11 -23 -30)。

现对50穴规格穴盘移栽,将含50株健康钵苗的移栽穴盘,分次全部移栽到10个待补苗空穴数量和位置都随机安排的目的穴盘中为一组试验终止。

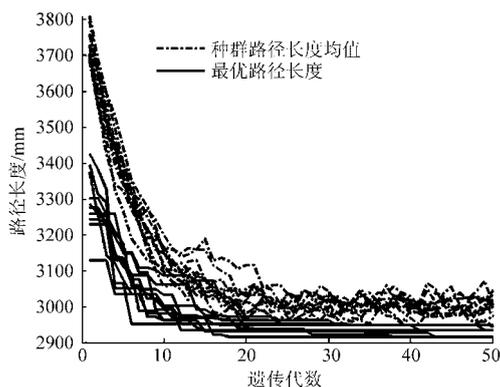


图 4 10 次运算路径长度随遗传代数变化曲线

Fig. 4 Curves of path lengths and generations

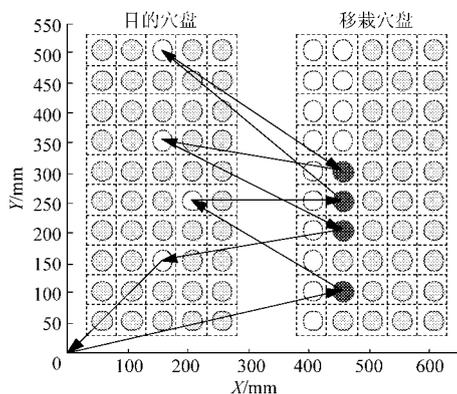


图 5 遗传算法优化后移钵路径

Fig. 5 Transplanting path optimized by GA

图 6 为分别采用图 3 所示的固定顺序法 (W1) 和遗传优化方法 (W2) 进行路径规划完成一组试验, 对应 10 个不同空穴数目的穴盘规划路径的长度变化。

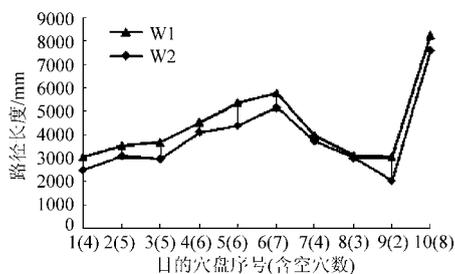


图 6 对应各目的穴盘的移钵路径长度变化

Fig. 6 Variation of path length corresponding to aim tray

依照图 6 中试验的方法进行 10 组试验, 对每组

中移栽满 10 个目的穴盘空穴的路径总长统计, 表 1 为 10 组试验所得固定顺序法规划的路径总长和遗传优化规划的路径总长及优化值。

从表 1 和图 6 试验结果分析知, 遗传算法规划路径较固定顺序法整体要优, 试验中缩短最小路径值在 3.7 m 以上, 机械臂所需运动行程减少明显, 但其被优化量与目的穴盘中空穴的数量及分布有很大相关。

表 1 两种路径规划路径总长及优化值

Tab. 1 Whole path length and optimized value of two path planning

组次	方法 W1 路径总长/mm	方法 W2 路径总长/mm	优化缩短路径长/mm	优化幅度/%
1	44 446	38 891	5 555	12.5
2	44 252	40 483	3 769	8.5
3	44 849	39 897	4 952	11.0
4	44 749	40 620	4 129	9.2
5	43 813	39 706	4 107	9.4
6	43 439	39 120	4 319	9.9
7	43 716	33 200	10 516	24.0
8	44 820	35 945	8 875	19.8
9	44 816	39 984	4 832	10.8
10	43 971	39 920	4 051	9.2

4 结论

本文提出一种基于遗传算法的移钵路径优化算法模型, 该方法具有以下特点:

(1) 利用该算法模型清晰的描述了钵苗位置随机分布和序列严格要求的移钵路径选择优化问题。

(2) 算法规划的路径长度较常规采用的固定顺序路径长度优化幅度 8.5% 以上, 稳定得到整体的优化路径。

(3) 算法平均运算时间 0.65 s, 快速得到移钵路径的优化解, 满足移钵作业实时性的要求。

(4) 对自动移钵作业路径进行优化, 移栽完 50 株钵苗与优化前采用方法对比, 执行器运动路径缩短 3.7 m 以上。

参 考 文 献

- 陈殿奎. 国内外蔬菜穴盘育苗发展综述[J]. 农业工程学报, 1999, 15(增刊): 107 ~ 111.
Chen Diankui. Summary of foreign and domestic vegetable corps plug transplants production [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1999, 15(Supp.): 107 ~ 111. (in Chinese)
- 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.
- 蒋焕煜, 施经挥, 任焯, 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 Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(5): 127 ~ 131. (in Chinese)

4 结论

(1)该 ABS 台架检测方法有效降低了试验成本,提高了检测效率及试验安全性。

(2)台架试验中的车身速度、车轮速度及滑移

率曲线的变化趋势与相应的 ABS 直线紧急制动道路试验一致,说明提出的台架检测方法能够模拟汽车在道路上进行直线紧急制动时的运行工况。

(3)以道路试验结果作为参考标准,台架试验结果中的关键技术参数与道路试验接近,误差小于5%。

参 考 文 献

- 1 杨坤,李静,李幼德,等.基于汽车电子机械制动系统的 EBD/ABS 研究[J].系统仿真学报,2009,21(6):1785~1788.
Yang Kun, Li Jing, Li Youde, et al. Study of EBD/ABS based on electromechanical brake system [J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(6):1785~1788. (in Chinese)
- 2 张为,丁能根,余贵珍,等.汽车 ABS 电子控制单元综合性能测试试验台[J].农业机械学报,2009,40(9):37~40.
Zhang Wei, Ding Nenggen, Yu Guizhen, et al. Development of integrative performance test bench of the vehicle ABS ECU [J]. Transactions of the Chinese Society for Agriculture Machinery, 2009, 40(9):37~40. (in Chinese)
- 3 Cheli F, Concas A, Giangiulio E, et al. A simplified ABS numerical model: comparison with HIL and full scale experimental tests [J]. Computers and Structures, 2008, 86(13~14):1494~1502.
- 4 黄有林.气压 ABS 硬件在环仿真试验台开发[D].长春:吉林大学,2007.
Huang Youlin. Development of air-ABS-HIL-simulation test bench [D]. Changchun: Jilin University, 2007. (in Chinese)
- 5 Ben Abdallah M, Ayadi M, Rotella F, et al. Linear time-varying flatness-based control of anti-lock brake system (ABS) [C]//2012 9th International Multi-conference on System, Signals and Devices, 2012; 1~6.
- 6 Zheng Taixiong, Wang Ling, Ma Fulei. Research on road identification method in anti-lock braking system [J]. Procedia Engineering, 2011, 15:194~198.
- 7 Bera T K, Bhattacharya K, Samantaray A K. Evaluation of antilock braking system with an integrated model of full vehicle system dynamics [J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2011, 19(10):2131~2150.
- 8 William Pasillas-Lépine, Antonio Loría, Mathieu Gerard. Design and experimental validation of a nonlinear wheel slip control algorithm [J]. Automatica, 2012, 48(8):1852~1859.
- 9 Bhandari R, Patil S, Singh R K. Surface prediction and control algorithms for anti-lock brake system [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2012, 21(1):181~195.
- 10 张小龙,李亮,宋健,等.汽车稳定性控制系统性能测试与数据处理方法[J].农业机械学报,2011,42(5):1~6.
Zhang Xiaolong, Li Liang, Song Jian, et al. Performance test and data processing method for vehicle electronic stability control system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agriculture Machinery, 2011, 42(5):1~6. (in Chinese)
- 11 Jeonghoon Song. Performance evaluation of a hybrid electric brake system with a sliding mode controller [J]. Mechatronics, 2005, 15(3):339~358.

(上接第 49 页)

- 4 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)
- 5 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)
- 6 刘凯,辜松. PLC 在穴盘苗移栽机器人控制系统中的应用[J].农机化研究,2009,31(12):179~180.
Liu Kai, Gu Song. The application of PLC in the control system of transplanting potted seedlings manipulator [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(12):179~180. (in Chinese)
- 7 Tong Junhua, Jiang Huanyu, Zhou Wei. Development of automatic system for the seedling transplanter based on machine vision technology [C]//2012 IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering, 2012, 2:742~746.
- 8 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)
- 9 Lawrence V Snyder, Mark S Daskin. A random-key genetic algorithm for the generalized traveling salesman problem [J]. European Journal of Operational Research, 2006, 174(1):38~53.
- 10 梁旗军,舒坚,樊鑫,等.一种基于遗传算法的 TSP 建模方法[J].计算机工程,2011,37(5):68~70.
Liang Qijun, Shu Jian, Fan Xin, et al. TSP modeling method based on genetic algorithm [J]. Computer Engineering, 2011, 37(5):68~70. (in Chinese)
- 11 周明,孙树栋.遗传算法原理及应用[M].北京:国防工业出版社,2005.