

名优茶采摘机器人路径规划

原艳芳, 郑相周*, 林卫国

(华中农业大学工学院, 武汉 430070)

摘要: 提出一种直角坐标系双机械手名优茶采摘机器人。采用积分求和方法, 按茶叶个数相等原则将采摘区域按左右两矩形区分配给2个机械手。使用蚁群算法进行机械手的采摘路径规划。以总采摘区域的路径半程作为目标, 分别进行了2区和将2区再划分为4区的采摘路径规划和优化。为避免采摘过程中2个机械手的干涉, 将每个机械手采摘区域分为2区, 并约束各运动路径左下角处茶叶为采摘起点。计算结果表明, 使每个机械手按“M”型路线采摘, 具有较好效果。改变自适应调节信息素浓度值和迭代终止条件, 可改善基本蚁群算法搜索时间较长和易陷入局部最优的缺陷, 并提高全局搜索能力和计算效率。仿真结果表明提出的采摘策略和规划路径可提高名优茶采摘效率。

关键词: 名优茶; 采摘机器人; 机械手; 蚁群算法; 路径规划

中图分类号: S225.99; TP242.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2017)03-0530-06

Path planning of picking robot for famous tea

YUAN Yanfang, ZHENG Xiangzhou, LIN Weiguo

(Engineering School, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070)

Abstract: For picking famous tea, a Cartesian robot with two mechanical hands was presented in this paper. Applied principles of integration, picking region was segmented to two rectangles, in which there was the equal number of tea leaves basically available to two picking hands. Ant colony algorithm was applied to producing picking path. Based on half way of picking path decided with ant colony algorithm for complete picking region, path planning and optimization were implemented for the segmented two regions and four regions segmented from the two ones, respectively. To avoid interference in picking, each hand picking region was divided to two sub-regions. Position of tea at low left corner of sub-region was then taken as the start point of picking route. It was demonstrated from calculations that the picking robot would have good performance when each hand moved along the route of "M" style with above settings. Adjusting pheromone density and terminating conditions in picking path planning could avoid being caught of searching for a long time and falling into local optimum in ant colony computation. With the simulation results, it was illustrated that the picking strategies and planning path put forward in this paper are suitable to enhance efficiency of tea picking.

Key words: famous tea; tea picking robot; mechanical hand; ant colony algorithm; path planning

名优茶产业价值占茶叶总产值的比例逐年上升。名优茶采摘以低效手工采摘为主, 成本高且因产业结构化调整, 劳动力紧张, 其采摘机械化是必然发展趋势^[1-3]。目前市场上采茶机由于无选择性, 只适用于大宗茶, 不适用于名优茶采摘。文献[4]研究了名优茶并联采摘机器人, 对并联机构和末端执行器进行结构设计, 仿真得到其工作空间为 300 mm×300 mm×120 mm, 工作范围有限, 成本

高, 其末端执行器采用丝杠带动夹子采茶, 不利于茶叶收集。文献[5]设计了一种自走式智能田间采茶机器人, 使用图像技术识别茶叶, 舵机驱动机械手, 手爪为反向啮合齿轮带动刀片开合, 由于为单手爪采摘, 效率较低。文献[6]将龙门式茶叶采摘机器人改进为双臂式采摘机器人, 采用悬臂梁式结构, 茶蓬较宽时可能产生振动。

影响名优茶机械采摘效率最重要的因素有 2

收稿日期: 2016-09-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51305152)资助。

作者简介: 原艳芳, 硕士研究生。E-mail: ayuan19910312@163.com

* 通信作者: 郑相周, 副教授。E-mail: zhxhzc@163.com

个, 一个是鲜叶识别, 另一个是机械采摘效率, 而采摘机械的结构构成和采摘路径是影响机械采摘效率的两个重要因素。本研究提出一种直角坐标系双手名优茶采摘机器人, 采用图像技术获得嫩芽坐标, 控制 2 个机械手同时采摘茶叶, 并用真空装置收集; 使用蚁群算法规划采摘路径, 以提高名优茶采摘效率。

1 采茶机器人结构及工作原理

茶叶采摘机器人由高地隙动力底盘、图像获取装置、采茶机械手和茶叶收集装置等构成。高地隙动力底盘地隙和轮距可调, 骑跨在茶蓬上, 茶蓬全宽均为采摘区域; 图像获取装置由工业相机和光栅式投影仪构成, 通过图像处理可识别并获得鲜叶位置坐标; 控制系统根据鲜叶坐标, 按茶叶个数相等原则将采摘区域分配给 2 个机械手, 并规划各自的采摘路径后, 控制 2 个采摘机械手同时进行采摘; 采摘完成时机械手内部形成封闭空间, 通过吹气加吸气的方将已采摘的鲜叶收集至容纳箱中。

茶叶采摘机器人有左右 2 个机械手。机械手运动采用直角坐标系结构, 其 X 、 Y 、 Z 三向运动均由步进电机控制, 其中 X 为茶蓬纵向, Y 为茶蓬横向, Z 为垂直地面方向。采摘机器人如图 1 所示。

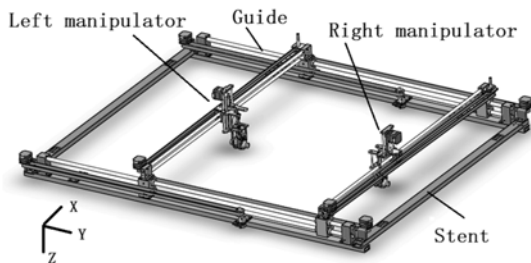


图 1 名优茶采摘机器人

Figure 1 Packing robot for famous tea

为改善机械手运动中的振动问题, 各向均使用双导轨支撑。2 个机械手同时采摘, 且两者在茶蓬横向有重叠采摘区间, 以便茶叶分布不均时, 使 2 个机械手具有尽可能相同的采摘时间, 这是提高芽叶采摘效率的主要结构措施之一。

单个机械手工作空间为 $1\text{ m} \times 0.8\text{ m} \times 0.2\text{ m}$ 的长方体, 2 个机械手工作空间有 $1/3$ 重叠, 采摘机器人工作空间为 $1\text{ m} \times 1.2\text{ m} \times 0.2\text{ m}$, 适合一般情况下的茶蓬宽度和茶叶分布高度。

茶叶采摘机械手结构如图 2 所示, 采用曲柄滑块机构原理, 如图 3 所示。由转动副约束的 2 个圆弧刀片沿圆弧运动。气缸上升时, 机构驱动 2 刀片

沿圆弧张开, 便于机械手移动到茶叶采摘位置; 气缸下降时, 2 刀片闭合, 将鲜叶掐断并同时构成封闭圆柱空腔。圆柱空腔两端连接塑料软管, 利用真空装置将茶叶送至容纳箱。气缸下降极限位置由挡块限制, 调整挡块位置可控制圆弧刀片闭合而不相撞。茶叶嫩芽掐断力的量级为克, 选择较好的材料, 就可保证刀片的高耐用度。

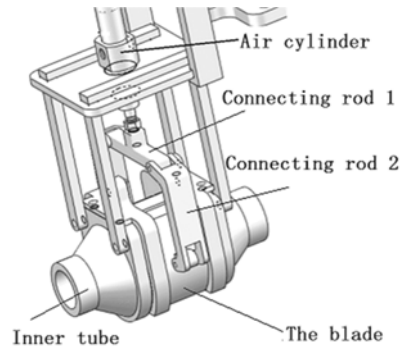


图 2 机械手

Figure 2 Manipulator

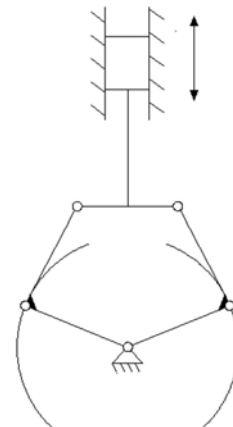


图 3 机械手机构运动简图

Figure 3 The mechanism motion diagram of manipulator

鲜叶采摘时, 机械手在 3 维空间运动到鲜叶采摘点进行采摘, 为了减少机械手运动和茶蓬间的相互影响, 控制使机械手先在 XY 平面内到达采摘位置再沿 Z 轴向下运动, 刀片闭合掐断鲜叶; 然后机械手沿 Z 轴向上运动到设定点, 再移向下一个鲜叶。重复上述过程, 完成鲜叶采摘。在鲜叶采摘过程中控制系统使机械手运动过程和鲜叶收集过程重合, 可进一步提高采摘效率。

在采摘区域中茶叶数量较多, 机械手运动轨迹肯定会影响到采摘效率。由于机械手在 3 维空间运动, 为了简化起见, 下文仅考虑 XY 平面内的机械手路径规划问题。

2 采摘策略

为提高单芽采摘效率，使用蚁群算法确定鲜叶采摘路径。蚁群算法规划的路径起点位置是随机的，由于2机械手同时采摘，对鲜叶进行分区，在获得分区最优路径后通过限制采摘起点以避免机械手间的干涉。

2.1 茶叶分区

图4所示为确定鲜叶采摘位置的原始茶叶图像，于清明前拍摄，嫩芽平面坐标由图像处理得到。为便于处理，对茶叶坐标值进行了归一化处理，归一化后数值乘1000。鲜叶位置分布如图5所示。



图4 茶叶图像
Figure 4 The tea image

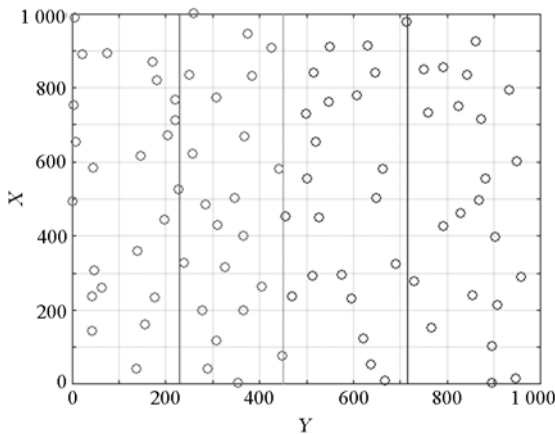


图5 鲜叶位置平面分布
Figure 5 The plane distribution of tea leaves

为保证2机械手采摘时间相同，采用积分求和方法，按茶叶个数相等原则将采摘区域分成2部分。若因鲜叶生长分布不均匀导致分割线超出机械手工作空间时，规定分界线为机械手极限工作位置。

如图5所示，原始图像中鲜叶总数为89，确定中间线 $x=450$ 为左右区域分界线，左区为左机械手任务区，鲜叶数45；右机械手的右区鲜叶数为44。使用同样的方法将每个机械手再分区，从左至右1~4共4个分区鲜叶数依次为23、22、22和22。将机械手采摘区域分为2片，采摘时机械手分别从1、3区开始，可避免2个机械手工作时产生碰撞。

2.2 基本蚁群算法

鲜叶采摘时间取决于采摘时间较长的那个机械手。在规划路径时，蚁群算法中各参数的最优值选取以缩短时间为目标，即优化相对路径较长的机械手采摘路径。蚁群算法是一种寻找优化路径的先进算法，适于用来进行机械手采摘路径规划。

将 m 只蚂蚁随机置于具有 n 个点的区域，每只蚂蚁利用信息素浓度和启发信息选择下一个要到达的点，且不重复路过同一点，最终回到原点，从中得到一条最优路径^[7-8]。根据基本蚁群算法的流程^[9-11]可确定蚂蚁 k 在茶叶 i 选择下一个茶叶 j 时的转移概率 P_{ij}^k 为

$$P_{ij}^k = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha(t)\eta_{ij}^\beta(t)}{\sum_{s \in allowed_k} \tau_{is}^\alpha(t)\eta_{is}^\beta(t)}, & j \in allowed_k \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (1)$$

其中， $allowed_k = \{0, 1, \Delta, n-1\}$ 表示蚂蚁 k 下一步可以选择的茶叶集合，茶叶 i 与茶叶 j 间的距离为 D_{ij} ，两者间信息素浓度为 $\tau_{ij}(t)$ 。 $\eta_{ij}(t)$ 为启发函数，反映由茶叶 i 到茶叶 j 的期望程度， $\eta_{ij} = 1/D_{ij}$ 。 α 为信息素重要程度因子； β 为启发函数重要程度因子。

路径上的信息素具有挥发性，设 ρ ($0 < \rho < 1$) 表示信息素轨迹的持久性， $1 - \rho$ 为信息素的挥发程度。经过 n 个时刻，所有蚂蚁完成1次循环，对各路径上信息素进行更新，即

$$\tau_{ij}(t+n) = \rho * \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij} \quad \rho \in (0,1) \quad (2)$$

其中， $\Delta\tau_{ij} = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k$ 。 $\Delta\tau_{ij}^k$ 表示蚂蚁 k 在此次循环中留在茶叶 i 到茶叶 j 连接路径上的信息素量， $\Delta\tau_{ij}$ 表示此次循环所有蚂蚁在路径 (i,j) 上留下的信息素之和。

关于蚂蚁释放信息素的问题，Dorigo 给出了3种模型^[12-13]，即蚁量模型 (Ant quantity system)，蚁密模型 (Ant density system) 和蚁周模型 (Ant cycle system)，3种模型的差别在于 $\Delta\tau_{ij}^k$ 的表达式不同，在一系列标准测试问题上运行的结果表明，蚁周模

型算法的性能优于其他 2 种。所以, 本研究中基本蚁群算法选用蚁周模型。蚁周模型中, $\Delta\tau_{ij}^k$ 的计算公式为

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} Q/L_k, & \text{蚂蚁 } k \text{ 在此次循环中经过 } (i, j) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

其中, L_k 为蚂蚁 k 在本次循环中所走路程的长度值。 Q 为与信息素总量相关的常数。

2.3 改进蚁群算法

与其他模拟进化算法一样, 基本蚁群算法也存在收敛速度慢, 容易陷入局部最优解等问题^[14-15]。为了改善以上缺陷, 本研究提出新的迭代终止条件并将信息素浓度值改为自适应值。结合基本蚁群算法中迭代次数与采茶路径距离的关系, 规定当连续 20 次迭代的最优解没有明显改善, 即连续 20 次迭代满足相邻两次的最优解差值都小于等于最优解的 0.1% 时停止迭代, 数据较少时可避免冗余迭代, 节省计算时间; 数据较多时避免迭代次数不足而得不到最优解。由于信息素具有挥发性, 使得从未被搜索的路径上的信息素减小甚至为 0, 降低了解的全局搜索能力; ρ 过大时, 使得以前搜索过的解被选择的可能性过大, 也会影响解的全局搜索能力, 减小 ρ 可提高解的全局搜索能力, 但会降低收敛速度^[16], 因此将信息素轨迹的持久性参数 ρ 使用自适应变化值。本研究将 ρ 初始值设为 1, 当连续 10 次最优解没有明显改善, 即连续 10 次迭代相邻两次最优解差值都小于等于最优解的 0.1% 时, ρ 减为 0.95ρ ; 当 $\rho < 0.1$ 时使 $\rho = 0.1$, 避免 ρ 无限减小。

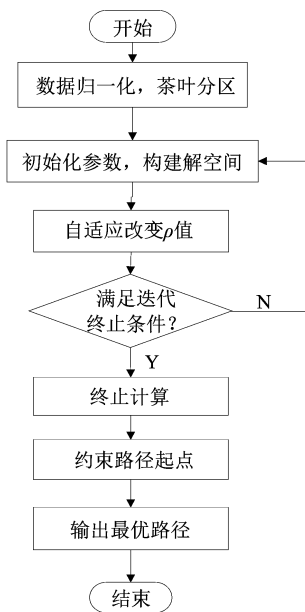


图 6 改进蚁群算法流程

Figure 6 The process of improved ant colony algorithm

改进蚁群算法优化茶叶采摘路径的计算过程如图 6 所示。根据获得的鲜叶坐标信息分区后进行参数初始化, 所有蚂蚁随机选择开始访问茶叶, 根据状态转移概率公式 (1) 和路径上的信息素浓度搜索路径, 构建解空间。每次循环结束根据公式 (2) 和 (3) 对各鲜叶间的信息素浓度进行更新。当满足迭代终止条件时终止计算, 然后约束左下角的鲜叶为路径的起点, 之后输出最优路径。当不满足迭代终止条件时, 清空蚂蚁路径记录表, 迭代次数加 1, 重新进行循环求解。

3 实验仿真

3.1 基本蚁群算法仿真

目前还没有能够确定蚁群算法最优参数组合的数学模型。本研究通过仿真来获得最优参数的统计数据, 从而确定最优参数组合。蚁群算法中的主要参数为 m 、 α 、 β 、 ρ 和 Q 。为避免偶然情况, 每个参数仿真 20 次, 然后取平均值。

对茶叶坐标数据分别按全局、2 区及 4 区仿真, 选取了多组茶叶图像计算, 结果表明当蚂蚁个数 m 与各区域茶叶个数相当时, 路径规划较优。

以图 5 为对象, 其嫩芽个数为 89 个, 将茶叶分为 4 个区, 迭代次数设 100。对 m 、 α 、 β 、 ρ 和 Q 依次选优, 蚂蚁个数的测试值为 $m \in \{15, 20, 25, 30, 35\}$, 初设其他参数为: $\alpha = 1$, $\beta = 1$, $\rho = 1$, $Q = 1$ 。仿真结果表明当蚂蚁个数为 25, 约为茶叶数量的 1/4, 计算得左机械手平均最短路径为 4 971, 右机械手平均最短路径为 4 892。因 2 机械手同时工作, 为减小总工作时间, 参数优化以减小左手最短路径值为目标, 同时满足右手路径小于左手路径。对已完成选优的参数选其最优值作为未进行选优参数的基本参数, 例如优化 ρ 时, 使用 m 、 α 、 β 的最优值, $Q = 1$ 。这是一种改进的单因素分析方法。

规定被测试值为: $\alpha \in \{0.5, 1, 5, 10, 15, 20\}$, $\beta \in \{0.5, 1, 5, 10, 15, 20\}$, $\rho \in \{0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9\}$, $Q \in \{1, 10, 50, 100, 500, 1\ 000\}$ 。仿真结果如表 1 所示。

仿真结果表明, α 、 β 、 ρ 对最优解影响较大, Q 影响较小, 最佳参数组合为 $\alpha = 1$ 、 $\beta = 5$ 、 $\rho = 0.9$ 和 $Q = 1$, 此时最短路径左手为 4 665.5, 右手为 4 545.0, 如图 7 所示。

图 7 中, 左红色线条为左机械手采摘路径, 右蓝色线条为右机械手采摘路径, 均约束了运动区域的左下角处茶叶为采摘起点, 使得机械手运动呈“M”型。

使用同样的方法对总区域和 2 区进行了计算。

总区域路径半程为 4 584.5, 上述 4 区方法中左手路径与之相比大 1.7%, 相差不大。2 区情况中右手路径比左手较长, 为 4 399.0, 但 2 区分法中两个机械

手采茶过程可能发生干涉, 而将路径规划为“M”型路线可避免干涉发生。

表 1 基本蚁群算法基于统计的参数化优化结果

Table 1 The results of parametric optimization based on the basic ant colony algorithm

参数 Paramete	优化结果 Optimization results					
α	0.5	1	5	10	15	20
平均最短路径 The average shortest path	4 670.5	4 666.4	4 678.2	4 701.9	4 693.0	4 710.9
β	0.5	1	5	10	15	20
平均最短路径 The average shortest path	6 536.6	4 971.4	4 666.3	4 683.5	4 687.7	4 717.2
ρ	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	
平均最短路径 The average shortest path	4 691.2	4 682.3	4 685.6	4 669.3	4 665.9	
Q	1	10	50	100	500	1 000
平均最短路径 The average shortest path	4 665.5	4 667.2	4 666.0	4 667.4	4 670.6	4 675.0

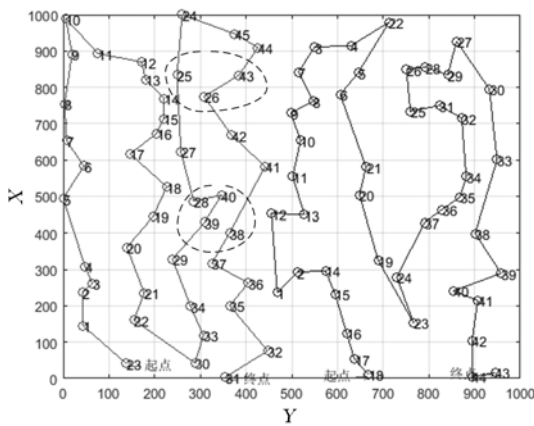


图 7 基本蚁群算法采茶最优路径

Figure 7 The optimal path for packing based on the basic ant colony algorithm

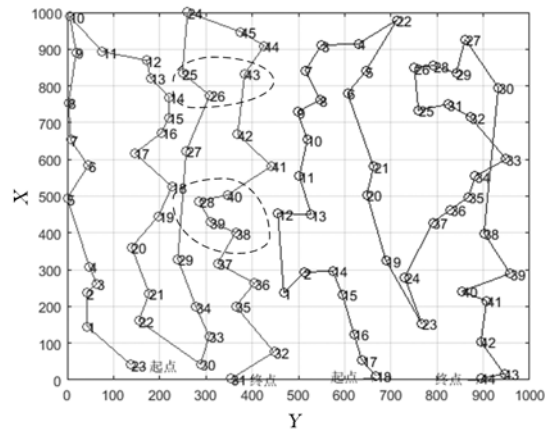


图 8 改进蚁群算法采茶最优路径

Figure 8 The optimal path for packing based on the improved ant colony algorithm

3.2 改进蚁群算法仿真

为了改善基本蚁群算法的缺陷, 提高最优解的全局性及收敛速度, 根据基本蚁群算法对茶叶采摘路径的规划情况, 本研究改善迭代终止条件并使用自适应的信息素浓度的持久性参数 ρ 。图 5 中, 使用相同最优参数组合进行仿真, 改进蚁群算法得到

的最短路径左手为 4 635.1, 右手为 4 516.9, 路径如图 8 所示。

与基本蚁群算法数据对比如表 2 所示, 改进蚁群算法结果稍优。改进蚁群算法的运算时间和迭代次数明显改善, 可有效提高机械手的工作效率。两者收敛曲线对比如图 9 所示。

表 2 改进蚁群算法与基本蚁群算法对比

Table 2 The comparison result of the improved ant colony algorithm and the basic ant colony algorithm

算法 Algorithm	平均最短距离 The average shortest path	运算时间 Operation time	迭代次数 The number of iterations
基本蚁群算法 The basic ant colony algorithm	4 665.5	25	100
改进蚁群算法 The improved ant colony algorithm	4 635.1	10	35

针对不同的茶叶分布情况, 本研究用同样的方法进行路径规划。统计计算结果表明, 改进蚁群算法路径小于基本蚁群算法结果, 且运算时间和迭代次数明显减小。

4 结论

本研究提出的名优茶采摘机器人, 在结构和控制上采取多种措施提高采摘效率。采摘机器人使用 2 个机械手, 且有重叠工作空间, 将采摘区域平均

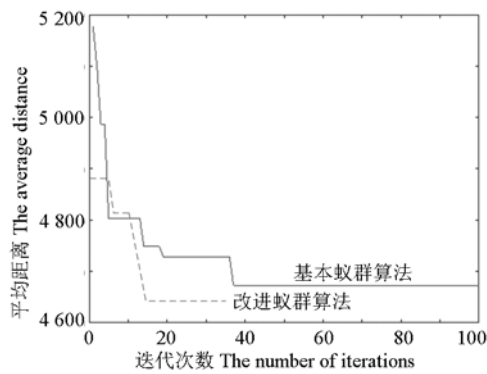


图 9 收敛曲线对比

Figure 9 The comparison result of the improved ant colony algorithm and the basic ant colony algorithm

分配给两手,使两手采摘时间接近;机械手采用圆筒式封闭结构,使机械手运动和鲜叶收集同时进行;将各手采摘区域分为2区,使用蚁群算法确定采摘路径,约束机械手路径为“M”型,避免两手工作过程中发生干涉。改进蚁群算法采用自适应信息素浓度参数和改善的迭代终止条件,可获得全局最优解,加快收敛速度,优于基本蚁群算法。

参考文献:

- [1] 盛忠雷, 邓敏, 杨海滨, 等. 茶园机械应用进展与前景展望[J]. 现代农业科技, 2015 (19): 208-210.
- [2] 韩余, 肖宏儒, 秦广明, 等. 国内外采茶机械发展状况研究[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(2): 20-24.
- [3] 曹挥华, 聂樟庆, 朱运华, 等. 名优茶机械化采摘技术研究进展[J]. 蚕桑茶叶通讯, 2016, 44(1): 23-24.
- [4] 高凤. 名优茶并联采摘机器人结构与仿真[D]. 南京:南京林业大学, 2013: 6-38.
- [5] 秦广明, 赵映, 肖宏儒, 等. 4CZ-12 智能采茶机器人设计及田间试验[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(1): 152-156.
- [6] 陆鑫, 李恒, 徐丽明, 等. 双臂式茶叶采摘机器人的改进设计[J]. 农机化研究, 2015, 37(2): 101-106.
- [7] 李士勇. 蚁群算法及其应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004: 22-27.
- [8] KOLAVALI S R, BHATNAGAR S. Ant colony optimization algorithms for shortest path problems[C]//International conference on network control and optimization. Springer Berlin Heidelberg, 2008: 37-44.
- [9] 段海滨, 王道波, 于秀芬. 蚁群算法的研究现状及其展望[J]. 中国工程科学, 2007, 9(2): 98-102.
- [10] DORIGO M, GAMBARDELLA L M. Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem[J]. IEEE T Evolut Comput, 1997, 1(1): 53-66.
- [11] 段海滨. 蚁群算法原理及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 21-30.
- [12] DORIGO M, MANIEZZO V, COLORMI A, et al. Positive feedback as a search strategy[J]. Tech Rep, 1991: 91-106.
- [13] BULLNHEIMER B, HARTL R F, STRAUSS C. Applying the ant system to the vehicle routing problem[M]. New York: Springer US, 1999: 285-296.
- [14] 刘硕, 陈毅雨, 钟斌, 等. 基于自适应蚁群算法的无人机最优路径规划[J]. 军械工程学院学报, 2016, 28(1): 47-50.
- [15] 苑严伟, 张小超, 胡小安. 苹果采摘路径规划最优化算法与仿真实现[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 141-143.
- [16] 王颖, 谢剑颖. 一种自适应蚁群算法及其仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(1): 31-33.