



计算机集成制造系统
Computer Integrated Manufacturing Systems
ISSN 1006-5911, CN 11-5946/TP

《计算机集成制造系统》网络首发论文

题目： 基于 RFID 库存管理的无人机三维路径规划研究
作者： 鲁建厦，赵林斌
收稿日期： 2017-06-23
网络首发日期： 2018-01-09
引用格式： 鲁建厦，赵林斌. 基于 RFID 库存管理的无人机三维路径规划研究. 计算机集成制造系统. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20180108.1727.010.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发纸质期刊已正式录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿的论文。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于 RFID 库存管理的无人机三维路径规划研究¹

鲁建厦^{1,2}，赵林斌¹

(1. 浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310032; 2. 浙江汇智物流装备技术有限公司, 浙江 湖州, 313028)

摘要：为了提高无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)搭载 RFID 读写器的盘点效率，规避 UAV 无效的盘点飞行，减少盘点飞行路径，提出了一种基于 RFID 库存管理的无人机三维路径规划方法。该方法首先在三维空间搭建一个飞行网络模型，并建立相应的坐标系；然后通过搭建危险壁障的适应度函数、搭建 RFID 读写器识别的适应度函数、搭建路径最小适应度函数来构造目标函数，确保 UAV 能够在采集到每个在制品库存信息的前提下求得目标函数的最小值。采用基于二次差分进化的混合蝙蝠算法对目标函数进行求解，获得全局最优的飞行路径。该方法全局搜索能力较好，鲁棒性强。通过仿真，验证了算法的有效性。

关键词：无人机；RFID；信息采集；三维路径规划；二次差分进化的混合蝙蝠算法

中图分类号：F416.67

文献标识码：A

Three - Dimensional Path Planning Research on UAV Base on RFID Inventory Management

Lu Jiansha^{1,2}, Zhao Linbin¹

(1. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, 310032, China; 2. Zhejiang Huizhi Logistics Equipment Technology Co., Ltd, Huzhou, 313028, China;)

Abstract: In order to improve the efficiency of UAV carrying RFID readers, to avoid the UAV invalid inventory flight, to reduce the inventory flight path, a method is proposed by considering RFID and UAV's three-dimensional path planning in collecting product information. This method establishes a flight network model in three-dimensional space and the relative coordinate system. Based on ensuring every product information can be collected by UAV, the minimum value of the objective function is got by constructing the constraint of dangerous barriers, RFID reader's indentation and the target function by the minimum fitness function. The optimal flight path is gained by a hybrid bat algorithm of quadratic differential evolution which can solve the objective function. This method has a good global search ability and strong robustness. Furthermore, the effectiveness of the algorithm is verified by simulation.

Key words: UAV; RFID; information collection; three-dimensional path planning; hybrid bats algorithm based on quadratic differential evolution

0 引言

随着物联网技术快速发展，射频识别技术(Radio Frequency Identification, RFID)，因为可以实现

¹ 收稿日期：2017-06-23；修订日期：2017-11-03。Received 23 Jun. 2017, accepted 03 Nov. 2017.

基金项目：浙江省自然科学基金资助项目(LY15G010009)，浙江省重点研发资助项目(2018C01003)。**Foundation items:** Project supported by the Natural Science Foundation of Zhejiang Province, China(No.LY15G010009), and Key Research and Development Projects of Zhejiang Province, China (No.2018C01003).

实时无线数据采集，被广泛的应用于物流、资产追踪、设备监控等领域^[1]。

RFID 在物流领域主要用于运输、存储、配送和出入库等环节。为了减少在制品信息采集过程中的人力的使用，Age 钢铁公司利用无人机加 RFID 技术在户外堆场追踪钢材产品的库存信息；2016 年德国 CeBIT 展会上，德国弗劳恩霍夫物流研究院(Fraunhofer IML)和 Aibotix 无人机公司合作展示了基于 RFID 技术的无人机库存管理系统。

可见，由于 UAV 体积小、质量轻、转弯灵活等特点^[2]，为了解决某些特殊环境下(例如高温、绝尘等生产环境下)的数据信息采集问题，已经开始采用基于 UAV 和 RFID 技术的在制品信息管理系统。在制品库存管理主要目的是能够及时、正确的掌握在制品的流动情况，控制在制品的数量，由此可以实时的掌握现场的实际生产状况、任务进度，保证生产连续均衡地进行，降低在制品储备量，加快企业资金周转，能够降低企业的生产成本，在制品库存信息采集相较于成品仓储信息盘点有不同点在于：①.在制品库存信息较成品信息复杂；②.在制品库存信息采集所在的生产环境较成品库存盘点环境复杂，成品库存盘点较在制品库存信息采集简便，在制品信息采集的路径规划可以适用于成品库存盘点。

在 UAV+RFID 技术中，UAV 路径规划问题是关键性技术，合理的规划路径能够使得 UAV 在库存信息采集过程中有效的规避障碍物，能够采集到在制品数据信息，且得到一条最优化的盘点路径。

G. Wang 使用蝙蝠算法解决了无人战斗机(UCAV)的二维路径优化问题^[3]，并通过实验与粒子群算法等其他方法比较，以验证蝙蝠算法的有效性；Daqi Zhu 提出使用自组织图和速度合成法对在地下工作区域内的无人潜艇的三维路径规划^[4]，实现潜艇在海洋动态潮流下的任务路径最短；陈家照提出一种基于改进粒子群优化算法的三维空间路径规划^[5]，通过粒子群算法将三维路径规划问题转化为二维空间上的路径规划问题来解决飞行器的三维路径规划问题。

但是，目前的文章多是纯粹的飞行器或无人潜艇的路径规划问题，没有对信息采集结合路径规划的研究。飞行器上搭载信息采集设备不仅需要飞行器在飞行过程中规避障碍物，同时还需要确保信息采集设备能够采集到相应的数据信息。

现阶段没有专门针对 UAV+RFID 的路径规划问题，大部分针对无人战斗机的路径规划问题是二维的，缺乏足够的灵活性，且没有涉及到信息采集的三维飞行路径的规划。

因此本文提出了 UAV+RFID 在制品信息采集的无人机三维路径规划的问题。旨在求解 UAV+RFID 在制品库存信息采集的最优化路径，确保在规避障碍物的前提下实现在制品库存的信息采集。

目前，各解决 UAV 的路径规划的算法主要有遗传算法(GA)、微分进化方法(DE)^[6]、萤火虫算法(FA)^[7]、杜鹃搜索算法(CS)^[8]、粒子群优化算法(PSO)^[9]、蚁群优化算法(ACO)^[10]、生物地理学优化算法(BBO)^[11]、混沌人工蜂群算法^[12]、智能水滴算法^[13]、蝙蝠算法等。然而，这些方法无法有效地处理局部搜索产生的大量数据信息跟全局优化之间的矛盾，并且以上方法都是通过坐标转化将三维路径规划问题转化为二维路径优化问题进行求解，这就导致第三维度的求解不准确。而蝙蝠算法(BA)可以通过蝙蝠个体三维空间的回声定位能力直接进行三维路径优化问题进行求解，精确度更高。

蝙蝠算法(BA)作为启发式算法后期收敛较快，导致算法全局搜索能力差，而二次差分法的局部差分策略(DE/best/1)其算子的全局搜索能力强。为解决 UAV+RFID 在生产现场的在制品信息采集问题提出了一种基于二次差分进化的混合蝙蝠算法(Hybrid Bat Algorithm, HBA)的 UAV 三维路径规划，能够增强算法的全局搜索能力，得到一条最优的无碰飞行路径。

1 UAV 三维路径规划数学模型建立

UAV+RFID 信息采集的路径规划问题本质上是在布满生产所需的生产设备的生产环境下，在合理的时间内，在满足 RFID 能够读取到所有在制品信息的前提下寻找一条最优的飞行路径进行在制品的信息采集。

UAV+RFID 三维路径规划模型如图 1 所示，图中以网格的形式标注出了 UAV 的空间任务、空间障碍物以及 RFID 的感应区域。

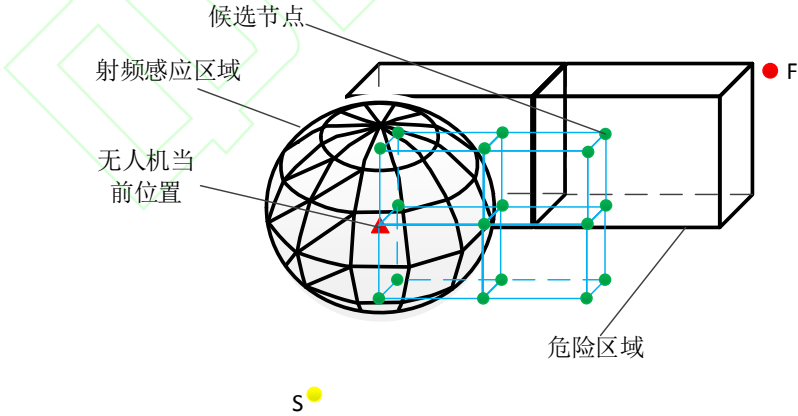


图 1 三维空间 UAV+RFID 飞行路径

首先，假设 UAV 从 S 点出发，到达目的地 F 点完成盘点任务。在飞行空间中(车间内)存在很多设备以及管道之类的危险区域。在 UAV 飞行过程中需要避开危险区域。将整个空间飞行路径划分成 m 个相等的子空间，且有 n 个飞行候选节点。

在该三维飞行任务空间建立以起点 S 为原点，以 S 点正东方向为 x 轴，y 轴垂直于 x 轴且与水平面平行，z 轴为过原点且垂直于 xoy 平面，如图 2 所示。

由上图可得，S 点为原点，坐标为(0,0,0)，假设由 S 点出发到 F 点经过 $L_1, L_2, \dots, L_n, L_i(x_i, y_i, z_i)$ 表示 UAV 飞行过程中的第 i 个节点，故 UAV 飞行全过程的路径可表示为：

$$\text{Path} = \{S, L_1, L_2 \dots L_{m-1}, F\} \quad (1)$$

UAV+RFID 路径规划的主要性能指标体现为：UAV 飞行安全性；信息采集点要在 RFID 读写器读取范围之内；起始点到终点的飞行距离。根据这三个路径规划的性能指标可以建立相应的适应度函数来限制

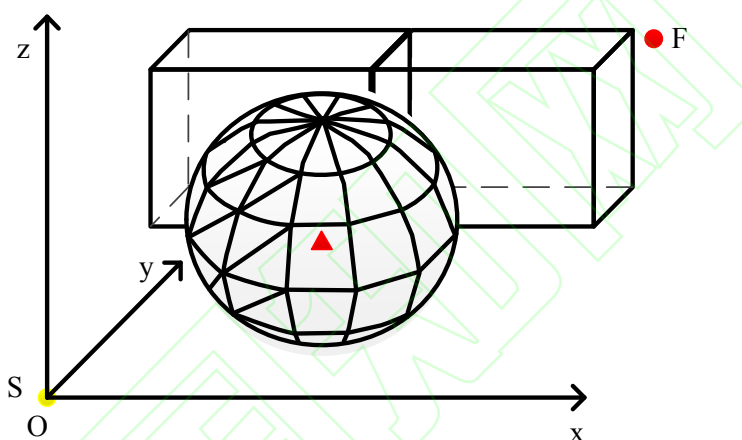


图 2 三维空间坐标系

UAV+RFID 的飞行路径，从三个 UAV+RFID 在制品信息采集的三个关键因素建立数学模型：

1. UAV+RFID 在制品信息采集需要 UAV 在飞行时规避生产车间内的障碍物，设置一个危险壁障的适应度函数，通过危险壁障适应度函数使得 UAV 与车间障碍物保持相应的距离来规避障碍物；

2. UAV+RFID 在制品信息采集需要 RFID 读写器在飞行过程中能够根据已知在制品暂存区的位置坐标的情况下，通过 RFID 读写器识别到每一个在制品的信息，故设置了 RFID 读写器识别的适应度函数来解决在制品信息采集的问题，通过 RFID 读写器识别的适应度函数来确保飞行路径中各个在制品暂存区都会在 UAV 飞行过程中的 RFID 读写器的射频识别范围内。

3. UAV+RFID 的三维路径规划问题首要任务为寻找从起始点到终点的最优路径，设置了路径最小适应度函数来求起始点和终点之间的最优路径。

1.1 危险壁障适应度函数

在实际生产车间内，布满了生产设备以及排气管道等飞行危险壁障，这些生产设备尺寸不一，位置排布没有规则，因此 UAV 在从起点飞行到终点的过程中需避开这些危险壁障，确保 UAV 始终

在安全无碰撞的范围内。由于将空间划分成了 m 个子空间，则飞行路径有 m 个节点构成，故需要判断每个节点是否与障碍物保持安全距离。同时对障碍物按照 UAV 半径进行膨胀，UAV 按照质点来处理^[14]，要求 UAV 在飞行过程中需与危险壁障保持一定的安全距离，则危险壁障适应度函数可以表示为：

$$f_1 = \prod_{i=1}^m \prod_{t=1}^{N_t} e^{\left(\frac{d-L^2}{e^{100(d-L^2)}}\right)^{\frac{1}{\delta^4}}} = \begin{cases} 1 & d = L^2 \\ \infty & d < L^2 \\ (1, \infty) & d > L^2 \end{cases} \quad (2)$$

$$d = (x_i - x_t)^2 + (y_i - y_t)^2 + (z_i - z_t)^2 \quad (3)$$

其中：

m ：UAV 飞行的节点数；

N_t ：危险壁障的数量；

d ：当前节点与危险壁障的距离的平方，其中 d 的取值由飞行空间决定；

L ：UAV 飞行时与危险壁障的安全距离；

δ ： δ 为定量，取 $\delta=0.01$ ；

$X_i(x_i, y_i, z_i)$ ：UAV 当前节点坐标；

$T(x_t, y_t, z_t)$ ：危险壁障的坐标。

函数 f_1 的取值范围为 $[1, \infty)$ ，只有当 UAV 飞行时与危险壁障距离正好为安全距离(即 $d=L^2$)时 f_1 取值为 1；当 UAV 飞行时距危险壁障小于安全距离(即 $d < L^2$)时， f_1 取值为 ∞ ；当 UAV 飞行时距危险壁障大于安全距离(即 $d > L^2$)时 f_1 取值为 $(1, \infty)$ 。

1.2 RFID 读写器识别适应度函数

UAV+RFID 实现在制品的信息采集，其主要工作任务为 RFID 读写器对在制品的信息进行识别并收集数据。首先对于在制品存放区域来说，其也是一个危险壁障，故 UAV 在飞行过程中遇到在制品存放区域时也需要满足公式(2)。其次，在 UAV 的飞行路径中要确保存在节点 $L_i(x_i, y_i, z_i)$ 与在制品存放区域的距离小于 RFID 读写器的读取距离。同时对在制品存放区域按照 UAV 半径进行膨胀，UAV 按照质点来处理，则 RFID 读写器识别的适应度函数可以表示为：

$$f_2 = \prod_{i=1}^m \left(\sum_{c=1}^N e^{-\left(\frac{\log_r l}{\log_r(l+1)}\right)^{-\delta^{-4}}} \right) / N = \begin{cases} = 1 & l = r - 1 \\ < 1 & l \neq r - 1 \end{cases} \quad (4)$$

$$l = \sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2 + (z_i - z_c)^2} \quad (5)$$

其中：

m ：UAV 飞行的节点数；

N: 在制品暂存区数量, 即信息采集点数量;

r: RFID 读写器的射频识别距离, 本文采用 RFID 读写器的识别距离为 6m;

l: 当前节点与信息采集点的距离;

δ : δ 为定量, 取 $\delta=0.01$;

$X_i(x_i, y_i, z_i)$: UAV 当前节点坐标;

$C(x_c, y_c, z_c)$: 信息采集点的坐标;

函数 f_2 的取值范围(0,1], 当 UAV 的飞行路径上存在点分别与 N 个信息采集点的坐标之间的距离都在读写器的识别距离之内 (即对 $\forall C$ 点都 \exists 点 X_i 满足 $l \leq r$) 时, f_2 的值越小, 即所求得的路径较短。

1.3 综合适应度函数

在三维路径规划中, 路径最短是算法最后需要达到的目标, 所以距离最小适应度函数为:

$$f_3 = \sum_{i=1}^m \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2 + (z_i - z_{i-1})^2} \quad (6)$$

将危险壁障适应度函数、RFID 读写器识别的适应度函数以及距离最小适应度函数综合在一起, 即可得到综合适应度函数为:

$$f = \min f_1 \times f_2 \times f_3 \quad (7)$$

其中 $f \neq 0$ 。

2 基于 UAV+RFID 三维路径规划的混合蝙蝠算法设计

2.1 差分进化算法

差分进化算法(Differential Evolution, DE), 是 Storn- R 和 Price K 于 1997 年提出的一种随机的并行搜索算法^[3]。DE 是一种基于智能种群理论的优化算法, 利用种群内个体之间的相互竞争与合作产生的种群智能模式进行优化搜索, 故可以得到其子代必然优于父代。与其他进化算法不同, DE 只需调整较少的参数就能完成基于种群的全局搜索策略, 降低了进化操作的复杂性。DE 独特的进化操作使其具有较强的鲁棒性和全局收敛能力。

其中局部差分策略(DE/best/1)具体执行方法:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + F^*(x_j - x_k) \quad (8)$$

其中 $x_i(t)$, x_j , x_k 为种群中的三个个体, F^* 为常量, 是一个放大系数。

2.2 蝙蝠算法

蝙蝠算法(bat algorithm, BA), 是有 Yang Xin-she 于 2010 年提出的一种元启发式搜索算法, 它来

源于微型蝙蝠的回声定位功能^[15]。该算法在求解过程中，蝙蝠个体所组成的群体从无序到有序进行演变，并调整响度、脉冲率、频率，搜索最优解。

使用蝙蝠算法(BA)进行最优化求解，就是首先利用蝙蝠个体的位置属性 X_i^t ，速度属性 v_i^t 以及频率属性 f_i 进行全局搜索^[7]。得到在 t 代蝙蝠个体的新位置如下：

$$f_i = f_{min} + (f_{max} - f_{min})\beta \quad (9)$$

$$v_i^t = v_i^{t-1} + (X_i^t - X_*)f_i \quad (10)$$

$$X_i^t = X_i^{t-1} + v_i^t \quad (11)$$

其中， $\beta \in [0,1]$ 是一个随机变量， X_* 是当前全局最佳位置。

蝙蝠个体进行局部搜索时，一旦选择了一条路径，它的新解决方案会在随机游走过程中就近产生：

$$X_{new} = X_{old} + \varepsilon A^t \quad (12)$$

其中， $\varepsilon \in [-1,1]$ 是一个随机变异因子， $A^t = \langle A_i^t \rangle$ 是所有蝙蝠在这一代的平均响度。

响度 A^t 和脉冲率 r_i^t 也要随着迭代过程进行更新：

$$A_i^t = \alpha A_i^{t-1} \quad (13)$$

$$r_i^t = r_i^0 [1 - e^{-\nu t}] \quad (14)$$

其中 α 为一个恒量，对于任何 $0 < \alpha < 1$ 都有：

$$A_i^t \rightarrow 0, r_i^t \rightarrow r_i^0 \quad (15)$$

初始化时，每只蝙蝠的响度都是随机给出的，通常定义初始的响度 A_i^0 在 $[1,2]$ 之间，初始的脉冲率 r_i^0 一般接近于 0，在最优解求解的过程中， A_i 和 r_i 是不断在更新的。

蝙蝠算法(BA)前期全局搜索能力较强，算法收敛速度快；后期 BA 容易陷入局部最优解。本文为避免计算最优路径时陷入局部最优，增加种群的多样性，利用局部差分策略(DE/best/1)对 BA 进行改进；其中 DE/best/1 变异算子可以增加蝙蝠的多样性便于算法更精细的搜索。G. Wang 等人验证了混合蝙蝠算法求解路径规划问题较其他启发式算法的有效性^[16]，故本文利用基于二次差分进化的混合蝙蝠算法(HBA)对本文的路径规划问题进行求解。

2.3 三维路径规划的混合蝙蝠算法设计

UAV+RFID 路径三维路径规划问题可以转化为对公式(7)中的目标函数 f 求最小值。对于该最小值问题，需要确保 UAV 能够以一个安全的三维路径完成其飞行任务，同时能够读取到每个信息采集点的数据信息。

蝙蝠算法是一种基于种群的元启发式算法，所以存在算法容易陷入早熟、易陷入局部最优化等缺陷。DE 存在多种变异策略，如 DE/best/1 局部搜索能力强，其变异算子便于算法更精细的搜索。故本文采用基于二次差分进化的混合蝙蝠算法(HBA)进行求解，通过加入局部差分策略(DE/best/1)防止 BA 过早的收敛，提高了最优解的精度^[11]。

其求解算法 HBA 的基本思想是种群中的 N 个蝙蝠个体在三维空间内通过回声定位和搜索空间的随机移动来更新蝙蝠个体的位置 X_i 和速度 v_i 。首先，需要随机选择一个蝙蝠的起始节点，接下来蝙蝠个体的位置 $X_i(x_i, y_i, z_i)$ 就可以通过公式(7)的目标函数 f 来计算。之后蝙蝠根据变异因子的突变操作来选择飞行网状图中的下一个节点，而并不是随机的飞行。这样就能够确保在迭代足够多的代数之后能够得到一个最短的 UAV 的飞行路径。其核心伪代码如下所示。

算法：Algorithm of HBA for UAV three-dimensional path planning

Begin

1. 初始化。设置迭代次数 $t=1$ ；初始化蝙蝠种群的位置 X_i 、速度 v_i 、频率 F 、 α 及响度 A ；设置放大系数 F^* 。
2. 计算初始解 $\text{fitness}(x) = f(x)$ (其中 x 为手动遥控无人机飞行的一条路径)以及最优初始化值 val_best 。
3. while $t < \text{Max Generation}$ do
 - 排列蝙蝠并找到最佳 X_* ；
 - for $i=1:N$ (所有节点数)
 - 生成随机变量 $r_1 \neq r_2 \neq r_3 \neq i$ ；
 - $r_4 = [N * \text{rand}]$;
 - $v_i^t = v_i^{t-1} + (X_i^t - X_*)F$;
 - $X_i^t = X_i^{t-1} + v_i^t$;
 - if($\text{rand} > r$) then
 - $X_{\text{new}} = X_{\text{old}} + \varepsilon A^t$;
 - else
 - $X_{\text{new}} = X_{r_1} + (X_{r_2} - X_{r_3})F^*$;
 - endif

```

if(rand<A && f(Xnew) < fitness(xi)) then
    Xi = Xnew;
    fitness(Xi) = f(Xnew);
    Ait = αAit-1;
    rit = ri0[1 - e-γt];
endif
end for
t=t+1;
end while
可视化结果
End

```

图 3 为基于 HBA 的 UAV+RFID 三维路径规划的实现流程图。

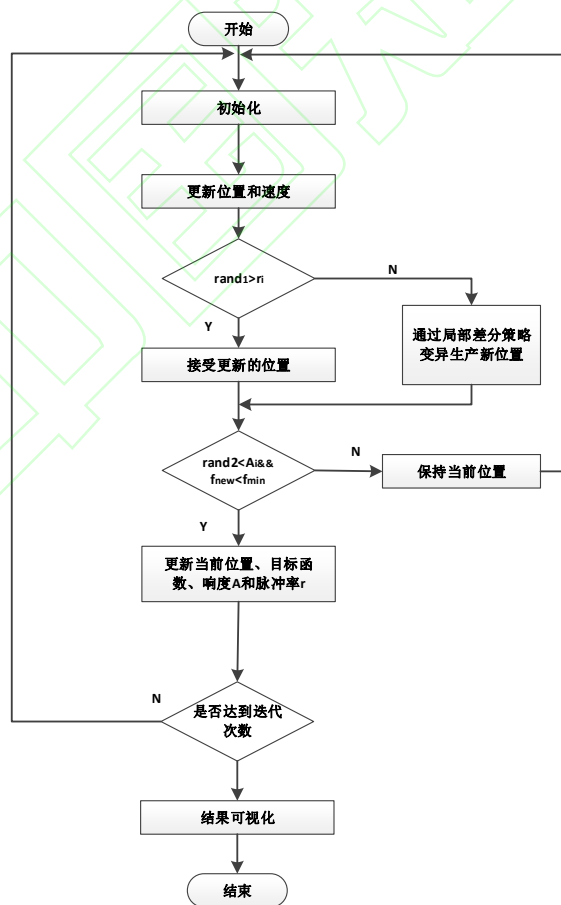


图 3 基于 HBA 的三维路径规划实现流程图

3 仿真研究

在本文的研究对象环境恶劣的生产车间内，有各种的生产设备排气管道等障碍物，而其中暂存区的信息采集点存在于很多这些生产设备的集群中，其中对于这类车间内的在制品的数据采集会带来很大的困难。图 4 为不锈钢制品的抛光车间，其中会产生很大的粉尘，采用人工盘点会影响员工的健康；对于生产区域及暂存区域较大的情况会存在 RFID 读写器识别距离不足，以及多 RFID 读写器之间射频干扰等问题。

因此采用 UAV+RFID 识别暂存区的在制品信息，通过 UAV 代替人工携带 RFID 读写器进行在制品的数据采集。

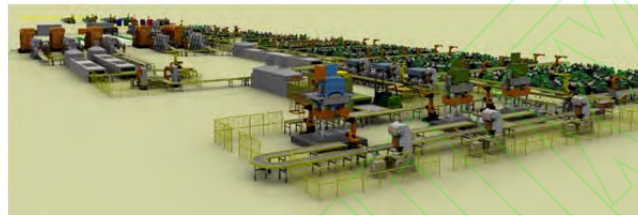


图 4 某抛光车间

为了验证 HBA 的有效性，本文进行了仿真实验。仿真平台为 Mathlab7.11.0，首先生产车间障碍物和信息采集点的位置及尺寸(本文用长方体代替障碍物和信息采集点)如图 5 所示，仿真原始尺寸为 $30*60*10$ ， $S(0,0,0)$ 和 $F(30,60,10)$ 分别代表飞行路径的起点和终点。其中蓝色物体表示障碍物，红色物体表示信息采集点，粉红色实线代表路径。其中障碍物的中心点 $b_1:(6.5,6.5,1.5)$; $b_2:(16.5,12.5,1)$; $b_3:(9,16,2)$; $b_4:(5.5,35,4)$; $b_5:(15,52.5,9.5)$; $b_6:(20,26,2)$; $b_7:(26,17,3)$; $b_8:(15,43,3)$; $b_9:(25.5,45.5,2.5)$; 长宽高分别为(3,5,3)、(3,5,2)、(6,8,4)、(5,20,8)、(20,5,1)、(2,12,4)、(4,26,6)、(10,10,6)、(5,5,5)。其中信息采集点的坐标为: $c_1:(12.5,8,1)$; $c_2:(21.5,4.5,1)$; $c_3:(14.5,29,1)$; $c_4:(25,37.5,2)$; $c_5:(26,51,1)$; 长宽高分别为(5,4,2)、(3,3,2)、(5,10,2)、(4,5,4)、(2,2,2)。

在该仿真试验中，仿真迭代次数为 100 次，其中障碍物和信息采集点随机设定，RFID 读写器的信息射频识别距离为 6m(即 6m 内的 RFID 标签都会被读写器识别)，其中取 $\alpha =0.9$ 、 $\gamma =0.9$ 、 $F^*=1.2$ 、 $\varepsilon =0.5$ 。

张航等人利用量子行为粒子群算法(QPSO)的对微型飞行器进行三维路径规划^[2]，首先将三维坐标数据通过坐标变换和离散有限平面的方法化简为一维数据，然后建立新地图和粒子适应度函数，适应度函数决定了静态和动态壁障的适应值，最后通过量子行为粒子群优化算法获得一条全局最优路径，对 UAV+RFID 数据模型进行计算可以得到一条 S 到 F 点的最优路径 L_2 ，其中 L_2 的长度为 88.82。仿真结果如图 7 所示。

通过 HBA 计算得到一条 UAV 从起始点 S 到终点 F 的最优飞行路径 L_3 , 其中 L_3 的长度为 75.26。
仿真结果如图 8 所示。

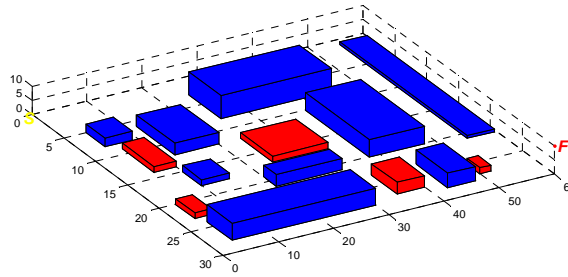


图 5 仿真环境

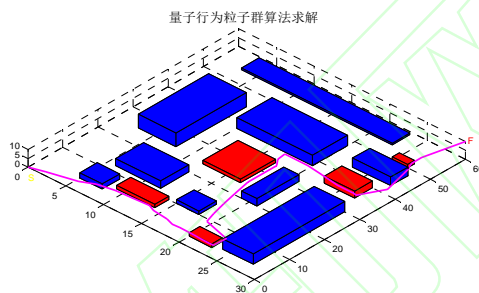


图 6 量子行为粒子群算法路径规划计算结果

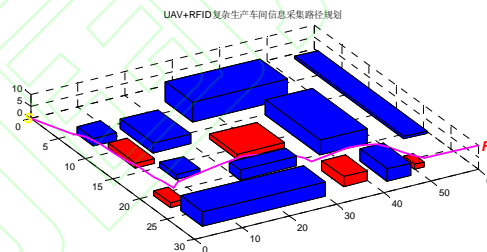


图 7 HBA 路径规划计算结果

QPSO 算法将三维平面通过坐标投影转化成二维平面坐标来处理, 其生成的路径为二维平面上的路径优化问题求得的最优解; 而 HBA 算法可以直接在三维平面上寻求一条最优路径, 不仅能在二维平面上寻优, 而且在三维上能够通过越过障碍物的上方来寻求最优路径。由上图可以看出, QPSO 算法所得的路径比 HBA 算法所得的路径要长, 通过距离的比较混合蝙蝠算法所得到的飞行路径最短, 故该仿真实验证实了 UAV+RFID 路径规划的有效性。

4 结束语

针对搭载 RFID 的无人机盘点飞行路径规划问题, 提出了基于 UAV+RFID 在制品信息采集的三维路径规划的方法, 利用 UAV 搭载 RFID 读写器进行在制品的信息采集, 并用基于二次差分进化混

合蝙蝠算法对 UAV+RFID 的飞行路径求解。在 RFID 读写器进行信息采集的同时,解决了 UAV 最优飞行路径的问题。在下一个阶段,将对多台 UAV 在盘点过程中的动态路径规划,以及 UAV 盘点过程中的自适应导航做进一步的研究。

参考文献

- [1] LIU H L, CHEN Q, LI Z H. Optimization. Techniques for RFID Complex Event Processing[J]. Journal of Computer Science and Technology, 2009, 24(4): 723–733.
- [2] ZHANG Hang, LIU Zixi. 3D path planning for micro air vehicles based on quantum-behaved particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Central South University of Technology, 2013,7: 58-65(in Chinese). [张航,刘梓溪,基于量子行为粒子群算法的微型飞行器三维路径规划[J]. 中南大学学报, 2013,7: 58-65.]
- [3] WANG G, GUO L, DUAN D, et al. A bat algorithm with mutation for UCAV path planning[J], The Science. World Journal. 2012 (2012) 1–15.
- [4] ZHU Daqi, HUANG Huan, SIMON X.Y. Dynamic Task Assignment and Path Planning of Multi-AUV System Based on an Improved Self-Organizing Map and Velocity Synthesis Method in Three-Dimensional Underwater Workspace[J]. IEEE TRANSACTIONS ON CYBERNETICS. APPL. 2013 (2)504-514.
- [5] CHEN Jiazhaoh, LUO Yinsheng. Path planning in 3D space based on improved particle swarm optimization[J]. Computer Application and Software, 2011, 11:262-265(in Chinese). [陈家照, 罗寅生, 基于改进粒子群优化算法的三维空间路径规划[J]. 计算机应用与软件, 2011, 11:262-265.]
- [6] SORN R, PRICE K. Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces, J. Glob. Optim. 11:1997:341–359.
- [7] YANG X S. Firefly algorithm, stochastic test functions and design optimization[J], International. Journal of Bio-Inspir. Computer., 2010,2:78–84.
- [8] YANG X S, DEB S. Cuckoo search: recent advances and applications[J], Neural Computing and applications., 2013,24(1):169–174.
- [9] KENNEDY J., EBERHART R. Particle swarm optimization[C], Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks, Washington, D.C., USA: IEEE, 1995, 1942–1948.
- [10] YE D, MA D W, FAN H D. Algorithm for low altitude penetration aircraft path planning with improved ant colony algorithm[J]. Chin. J. Aeronaut. 2005, 18(4): 304–309.
- [11] WANG G, GUO L, DUAN H, et al. Path planning for uninhabited combat aerial vehicle using hybrid meta-heuristic DE/BBO algorithm[J]. Adv. Sci. Eng. Med. 2012, 4(6):550–564.
- [12] XU C., DUAN H, LIU F. Chaotic artificial bee colony approach to Uninhabited Combat Air Vehicle (UCAV) path planning[J]. Aerospace Science. Technology. 2010, 14(8): 535–541.
- [13] DUAN H, LIU S, WU J. Novel intelligent water drops optimization approach to single UCAV smooth trajectory planning[J]. Aerospace Science. Technology. 2009, 13(8):442–449.
- [14] LI Haoyu, LYU Baimei. A 3D Space Path Searching Algorithm Based on Improved Ant Colony Optimization Algorithm[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2014:563-568(in Chinese). [李浩宇, 吕柏梅. 一种基于改进的蚁群优化算法的三维空间路径搜索算法[J]. 西北工业大学学报, 2014, 32(4):563-568.]
- [15] YANG X S. Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms[M]. UK, Luniver Press, Frome, 2010.
- [16] HE Zikuang. Improvement and application of the bat algorithm[D]. Guangdong: Guangdong University of Technology, 2016(in Chinese). [何子旷, 蝙蝠算法的改进与应用[D]. 广东: 广东工业大学, 2016.]

作者简介

赵林斌(1993-), 男, 浙江温岭人, 硕士研究生, 研究方向: 布局规划、RFID 系统等方面研究。E-mail: zlb1923@163.com.

鲁建厦(1963-), 男, 浙江余姚人, 教授, 博士生导师, 研究方向: 精益生产、RFID 系统、智能制造等。