



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102759357 B

(45) 授权公告日 2014. 11. 26

(21) 申请号 201210143927. 1

期), 第 10-12 页.

(22) 申请日 2012. 05. 10

审查员 张玉艳

(73) 专利权人 西北工业大学

地址 710072 陕西省西安市友谊西路 127 号

(72) 发明人 符小卫 李建 高晓光 李波

(74) 专利代理机构 西北工业大学专利中心

61204

代理人 顾潮琪

(51) Int. Cl.

G01C 21/20(2006. 01)

(56) 对比文件

CN 101122974 A, 2008. 02. 13, 全文.

US 2008/0312777 A1, 2008. 12. 18, 全文.

EP 2244150 A2, 2010. 10. 27, 全文.

CN 101963508 A, 2011. 02. 02, 全文.

包勇等. 势场理论的多无人机协同路径规划方法. 《火力与指挥控制》. 2012, 第 37 卷 (第 3

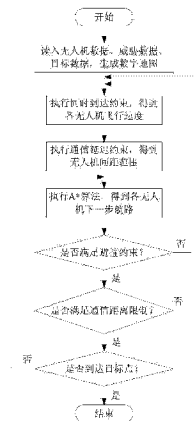
权利要求书1页 说明书5页 附图5页

(54) 发明名称

通信延迟下多无人机协同实时航路规划方法

(57) 摘要

本发明公开了一种通信延迟下多无人机协同实时航路规划方法,首先设置无人机数据、障碍数据和目标点数据,生成数字地图;然后执行同时到达约束,得到各无人机的飞行速度;执行通信延迟约束,得到无人机间距范围;执行 A* 算法,得到各无人机下一步航路;判断是否满足避撞约束和通信距离限制,最终判断是否到达目标点。本发明能够使多无人机在通信延迟下,从不同地点起飞,同时到达同一目标点,途中能够规避障碍,避免无人机间的碰撞,同时能够保持无人机间的通信。



1. 一种通信延迟下多无人机协同实时航路规划方法,其特征在于包括下述步骤:

本方法执行的时间步长为 Δt ,初始时间步长为 Δt_0 ,参与航路规划的无人机类型相同,无人机均飞行在相同高度,无人机的速度变化范围为 $v \in (v_{\min}, v_{\max})$,无人机间的最小安全距离为 d_{\min} ,最大通信限制距离为 d_{\max} ,执行通信延迟后,无人机间最小距离为 d'_{\min} ,最大距离为 d'_{\max} ;

步骤 1:设置无人机数据、障碍数据和目标点数据,生成数字地图;

无人机数据包括:无人机数量 n ,无人机初始位置坐标 (x_i, y_i) , $i = 1, 2, \dots, n$;

障碍数据包括:障碍数量 m ,障碍圆中心坐标 (x_j, y_j) ,半径 r_j , $j = 1, 2, \dots, m$;

目标点数据包括:目标点位置坐标 (x, y) ;

步骤 2:执行同时到达约束,得到各无人机的飞行速度 v_i , $v_i \in (v_{\min}, v_{\max})$,包括以下步骤:

1) 使用 A* 算法规划出各无人机在时间步长 Δt 下到目标点的最短路径;

2) 计算 $v \in (v_{\min}, v_{\max})$,每条路径对应的飞行时间集 S_{t_i} , $i = 1, 2, \dots, n$;

3) 判断 $S_{t_1}, S_{t_2}, S_{t_3}, \dots, S_{t_n}$ 是否有交集,若没有交集,进入步骤 4),若有交集,进入步骤 5);

4) 改变时间步长,在 Δt 基础上增加 Δt_0 ,转到步骤 1);

5) 取 $S_{t_1}, S_{t_2}, S_{t_3}, \dots, S_{t_n}$ 交集中使得 J 最小的 t 作为协同变量, t 是无人机从初始点到目标点的飞行时间;其中 $J = \sum_{i=1}^n J_i(x_i, v_i)$ 为多无人机协同的代价函数, J_i 是第 i 架无人机的飞行路径代价, x_i 是它的飞行路径, v_i 是它的飞行速度;

6) 取协同变量 t 对应的 v 为每架无人机的飞行速度;

步骤 3:执行通信延迟约束,得到相邻两无人机间距范围 $d'_{\min} = d_{\min} + (v_1 + v_2)t_d$, $d'_{\max} = d_{\max} - (v_1 + v_2)t_d$,其中 v_1, v_2 是相邻两无人机的速度, t_d 是通信延迟时间;

步骤 4:执行 A* 算法,得到各无人机下一步航路 $(x_i^{(p)}, y_i^{(p)})$;

步骤 5:计算 $d = \sqrt{(x_1^{(p)} - x_2^{(p)})^2 + (y_1^{(p)} - y_2^{(p)})^2}$,其中, $(x_1^{(p)}, y_1^{(p)})$ 和 $(x_2^{(p)}, y_2^{(p)})$ 是任意相邻两架无人机的实时位置坐标;

如果 $d \leq d'_{\min}$,两架无人机在遵循最大航迹倾斜角约束和不进入障碍区域的前提下,向增大两机距离的方向各运动一个路径步长,路径步长等于无人机速度乘以时间步长,转到步骤 2;否则转到步骤 6;

步骤 6:如果 $d \geq d'_{\max}$,两架无人机在遵循最大航迹倾斜角约束和不进入障碍区域的前提下,向减小两机距离的方向各运动一个路径步长,转到步骤 2;否则转到步骤 7;

步骤 7:如果 $(x_i^{(p)}, y_i^{(p)}) = (x, y)$,到达目标点,否则转到步骤 4。

通信延迟下多无人机协同实时航路规划方法

技术领域

[0001] 本发明涉及多无人机从不同地点起飞,避开障碍区域飞到同一目标点的实时航路规划方法,有关领域包括路径规划、协同控制和通信技术。

背景技术

[0002] 多无人机协同航路规划是多无人机协同规划中最基本的任务,它是多无人机协同执行其他任务如协同搜索、协同跟踪等任务的基础,可以应用于灾害中的人员搜索、定位以及事故地点的勘察、探测等,国内外的研究十分广泛。郝永军和周德云在论文《多无人机协同攻击路径规划研究》中提出了一种基于改进 A* 算法的多无人机协同航路规划算法。首先,构建了多无人机最优协同攻击路径规划系统框架;其次,以人工智能 A* 算法为基础,结合无人机运动学方程对 A* 算法进行了改进,得到一种基于步长搜索的无人机路径快速生成算法;再次,基于改进的路径快速生成算法,以多无人机同时攻击目标为约束条件,进行变步长的协同攻击仿真计算,从而得到多无人机协同攻击同一目标的规划路径。

[0003] 该算法没有考虑通信约束对航路规划算法的影响,而保证通信是多无人机协同的基本要素。多无人机在飞行过程中如果相距太远,就有可能脱离无人机通信平台的通信范围,导致无人机间无法进行通信,也就无法进行消息传递和数据交换。另外通信会有时间延迟,一架无人机发送的数据会在一定时间后才会被另一架无人机接收,这在协同航路规划中也需要考虑。

[0004] 通信约束是指多无人机协同航路规划中需要考虑的通信系统和通信设备自身存在的约束和限制,比如通信距离限制和通信时间延迟。

发明内容

[0005] 为了克服现有技术的不足,本发明提供一种通信延迟下多无人机协同实时航路规划方法,规划出通信延迟情况下多无人机协同飞行到达同一目标点的实时航路,多无人机在沿着规划出的航路飞行时能够保持通信,并能满足同时到达约束和避撞约束。

[0006] 本发明解决其技术问题所采用的技术方案包括以下步骤:

[0007] 假设本方法执行的时间步长为 Δt ,初始时间步长为 Δt_0 ,参与航路规划的无人机类型相同,无人机均飞行在相同高度,无人机的速度变化范围为 $v \in (v_{\min}, v_{\max})$,无人机间的最小安全距离为 d_{\min} ,最大通信限制距离为 d_{\max} ,执行通信延迟后,无人机间最小距离为 d'_{\min} ,最大距离为 d'_{\max} 。

[0008] 步骤 1:设置无人机数据、障碍数据和目标点数据,生成数字地图,以供 A* 算法调用。

[0009] 无人机数据包括:无人机数量 n ,无人机初始位置坐标 (x_i, y_i) ($i = 1, 2, \dots, n$);障碍数据包括:障碍数量 m ,障碍圆中心坐标 (x_j, y_j) ,半径 r_j ($j=1, 2, \dots, m$);目标点数据包括:目标点位置坐标 (x, y) 。

[0010] 步骤 2:执行同时到达约束,得到各无人机的飞行速度 v_i , $v_i \in (v_{\min}, v_{\max})$,包括以

下步骤：

- [0011] 1) 使用 A* 算法规划出各无人机在时间步长 Δt 下到目标点的最短路径；
 [0012] 2) 计算 $v \in (v_{\min}, v_{\max})$ ，每条路径对应的飞行时间集 $S_{t_i} (i = 1, 2, \dots, n)$ ；
 [0013] 3) 判断 $S_{t_1}, S_{t_2}, S_{t_3}, \dots$ 是否有交集，若没有交集，进入步骤 4)，若有交集，进入步骤 5)；
 [0014] 4) 改变时间步长，在 Δt 基础上增加 Δt_0 ，转到步骤 1)；
 [0015] 5) 取 $S_{t_1}, S_{t_2}, S_{t_3}, \dots$ 交集中使得 J 最小的 t 作为协同变量，t 是无人机从初始点到目标点的飞行时间；

[0016] 其中 $J = \sum_{i=1}^n J_i(x_i, v_i)$ 为多无人机协同的代价函数， J_i 是第 i 架无人机的飞行路径

代价， x_i 是它的飞行路径， v_i 是它的飞行速度。

[0017] 6) 取协同变量 t 对应的 v 为每架无人机的飞行速度。

[0018] 步骤 3：执行通信延迟约束，得到无人机间距范围。

[0019] 对于相邻两无人机，

$$[0020] \quad d'_{\min} = d_{\min} + (v_1 + v_2) t_d$$

$$[0021] \quad d'_{\max} = d_{\max} - (v_1 + v_2) t_d$$

[0022] 其中 v_1, v_2 是相邻两无人机的速度， t_d 是通信延迟时间。

[0023] 步骤 4：执行 A* 算法，得到各无人机下一步航路 $(x_i^{(p)}, y_i^{(p)})$ 。

[0024] 步骤 5：判断是否满足避撞约束。

[0025] 计算

$$[0026] \quad d = \sqrt{(x_1^{(p)} - x_2^{(p)})^2 + (y_1^{(p)} - y_2^{(p)})^2}$$

[0027] 其中， $(x_1^{(p)}, y_1^{(p)})$ 和 $(x_2^{(p)}, y_2^{(p)})$ 是任意相邻两架无人机的实时位置坐标。

[0028] 如果 $d \leq d'_{\min}$ ，两架无人机在遵循最大航迹倾斜角约束和不进入障碍区域的前提下，向增大两机距离的方向各运动一个路径步长，路径步长等于无人机速度乘以时间步长，转到步骤 2；否则转到步骤 6；

[0029] 步骤 6：判断是否满足通信距离限制。

[0030] 如果 $d \geq d'_{\max}$ ，两架无人机在遵循最大航迹倾斜角约束和不进入障碍区域的前提下，向减小两机距离的方向各运动一个路径步长，转到步骤 2；否则转到步骤 7；

[0031] 步骤 7：判断是否到达目标点。

[0032] 如果 $(x_i^{(p)}, y_i^{(p)}) = (x, y)$ ，到达目标点，否则转到步骤 4。

[0033] 本发明的有益效果是：由于采用步骤 2，多无人机可以在同一时间到达目标点；

[0034] 由于采用步骤 3，可以根据通信延迟时间修改无人机间的距离范围，使多无人机满足既不发生碰撞，也能保持通信；

[0035] 由于采用步骤 5，无人机间能避免发生碰撞；

[0036] 由于采用步骤 6，多无人机能保持在通信距离范围内。

[0037] 经验证，本发明设计的算法能够使多无人机在通信延迟下，从不同地点起飞，同时到达同一目标点，途中能够规避障碍，避免无人机间的碰撞，同时能够保持无人机间的通

信。

[0038] 下面结合附图和实施例对本发明进一步说明。

附图说明

- [0039] 图 1 是航路规划算法流程；
 [0040] 图 2 是同时到达约束流程；
 [0041] 图 3 是避撞约束流程；
 [0042] 图 4 是通信距离限制流程；
 [0043] 图 5 是未加通信约束时规划航路；
 [0044] 图 6 是加通信距离限制约束后规划航路；
 [0045] 图 7 是加通信时间延迟为 5s 后规划航路；
 [0046] 图 8 是加通信时间延迟为 10s 后规划航路。

具体实施方式

[0047] 假设算法执行的步长为 Δt , 初始步长为 Δt_0 , 参与航路规划的无人机类型相同, 无人机均飞行在相同高度, 无人机的速度变化范围为 $v \in (v_{\min}, v_{\max})$, 无人机间的最小安全距离为 d_{\min} , 最大通信限制距离为 d_{\max} , 执行通信延迟后, 无人机间最小距离为 d'_{\min} , 最大距离为 d'_{\max} 。算法执行的步骤如下(参见附图 1):

[0048] 步骤 1: 设置无人机数据、障碍数据和目标点数据, 生成数字地图, 以供 A* 算法调用。

[0049] 无人机数据包括: 无人机数量 n , 无人机初始位置坐标 (x_i, y_i) ($i = 1, 2, \dots, n$);

[0050] 障碍数据包括: 障碍数量 m , 障碍圆中心坐标 (x_j, y_j) , 半径 r_j ($j=1, 2, \dots, m$);

[0051] 目标点数据包括: 目标点位置坐标 (x, y) 。

[0052] 步骤 2: 执行同时到达约束, 得到各无人机的飞行速度 $v_i, v_i \in (v_{\min}, v_{\max})$ 。参见附图 2。

[0053] 7) 使用 A* 算法规划出各无人机在步长 Δt 下到目标点的最短路径;

[0054] 8) 计算 $v \in (v_{\min}, v_{\max})$, 每条路径对应的飞行时间集 S_{ti} ($i=1, 2, \dots, n$);

[0055] 9) 判断 $S_{t1}, S_{t2}, S_{t3}, \dots$ 是否有交集;

[0056] 10) 否, 改变步长 Δt , $\Delta t = \Delta t + \Delta t_0$, 转到 1);

[0057] 11) 是, 取 $S_{t1}, S_{t2}, S_{t3}, \dots$ 交集中使得 J 最小的 t 作为协同变量, t 是无人机从初始点到目标点的飞行时间;

[0058] 其中 $J = \sum_{i=1}^n J_i(x_i, v_i)$ 为多无人机协同的代价函数, J_i 是第 i 架无人机的飞行路径

代价, x_i 是它的飞行路径, v_i 是它的飞行速度。

[0059] 12) 取协同变量 t 对应的 v 为每架无人机的飞行速度。

[0060] 步骤 3: 执行通信延迟约束, 得到无人机间距范围。

[0061] 对于相邻两无人机,

[0062] $d'_{\min} = d_{\min} + (v_1 + v_2) t_d$

[0063] $d'_{\max} = d_{\max} - (v_1 + v_2) t_d$

[0064] 其中 v_1, v_2 是相邻两无人机的速度, t_d 是通信延迟时间。

[0065] 步骤 4 : 执行 A* 算法, 得到各无人机下一步航路 $(x_i^{(p)}, y_i^{(p)})$ 。

[0066] 步骤 5 : 判断是否满足避撞约束。参见附图 3。

[0067] 计算

$$[0068] \quad d = \sqrt{(x_1^{(p)} - x_2^{(p)})^2 + (y_1^{(p)} - y_2^{(p)})^2}$$

[0069] 其中, $(x_1^{(p)}, y_1^{(p)})$ 和 $(x_2^{(p)}, y_2^{(p)})$ 是任意相邻两架无人机的实时位置坐标。

[0070] 如果 $d \leq d'_{\min}$, 两架无人机在遵循最大航迹倾斜角约束和不进入障碍区域的前提下, 向增大两机距离的方向各运动一个路径步长(路径步长等于无人机速度乘以时间步长), 转到步骤 2 ; 否则转到步骤 6 ;

[0071] 步骤 6 : 判断是否满足通信距离限制。参见附图 4。

[0072] 如果 $d \geq d'_{\max}$, 两架无人机在遵循最大航迹倾斜角约束和不进入障碍区域的前提下, 向减小两机距离的方向各运动一个路径步长, 转到步骤 2 ; 否则转到步骤 7 ;

[0073] 步骤 7 : 判断是否到达目标点。

[0074] 如果 $(x_i^{(p)}, y_i^{(p)}) = (x, y)$, 仿真结束, 否则转到步骤 4。

[0075] 本发明通过计算机仿真进行了虚拟实施。

[0076] 仿真设定了一块 $90 \times 50 \text{km}$ 的矩形区域, 设定了 9 个障碍区域和 1 个目标点, 设定了 3 架类型相同的无人机, 均具有相同的过载和速度变化范围 $v \in (100 \text{m/s}, 150 \text{m/s})$ 。假设无人机间最小安全距离 $d_{\min} = 0.1 \text{km}$, 最大通信限制距离 $d_{\max} = 15 \text{km}$, 初始仿真步长 Δt_0 设为 1s 。

[0077] M1) 设置无人机数据、障碍数据和目标点数据, 参加表 1、表 2 和表 3。

[0078] 表 1 无人机设置(单位 : km)

[0079]

	无人机 1	无人机 2	无人机 3
x 坐标	10	10	10
y 坐标	2	20	35

[0080] 表 2 障碍设置(单位 : km)

[0081]

障碍编号	x 坐标	y 坐标	半径
障碍 1	30	21	8
障碍 2	35	40	7
障碍 3	40	8	7
障碍 4	52	32	5
障碍 5	50	18	4
障碍 6	60	10	6
障碍 7	65	25	7
障碍 8	70	38	6

[0082]

障碍 9	80	20	5
------	----	----	---

[0083] 表 3 目标点设置(单位 :km)

	x 坐标	y 坐标
[0084] 目标点	80	20

[0085] M2) 执行同时到达约束,得到各无人机的飞行速度 $v_i, v_i \in (100\text{m/s}, 150\text{m/s})$ 。

[0086] 1) 使用 A* 算法规划出 3 架无人机在步长 Δt 下到目标点的最短路径 ;

[0087] 2) 计算 $v \in (100\text{m/s}, 150\text{m/s})$, 每条路径对应的飞行时间集 S_{ti} ;

[0088] 3) 判断 $S_{t1}, S_{t2}, S_{t3}, \dots$ 是否有交集 ;

[0089] 4) 否, 改变步长 $\Delta t, \Delta t = \Delta t + 1$, 转到 1) ;

[0090] 5) 是, 取 $S_{t1}, S_{t2}, S_{t3}, \dots$ 交集中使得 J 最小的 t 最为协同变量, t 是无人机从初始点到目标点的飞行时间 ;

[0091] 其中 $J = \sum_{i=1}^n J_i(x_i, v_i)$ 为多无人机协同的代价函数, J_i 是第 i 架无人机的飞行路径

代价, x_i 是它的飞行路径, v_i 是它的飞行速度。

[0092] 6) 取协同变量 t 对应的 v 为每架无人机的飞行速度。

[0093] M3) 执行通信延迟约束, 得到无人机间距范围。

[0094] 对于相邻两无人机,

$$[0095] \quad d'_{\min} = 0.1 + (v_1 + v_2) t_d$$

$$[0096] \quad d'_{\max} = 15 - (v_1 + v_2) t_d$$

[0097] 其中 v_1, v_2 是相邻两无人机的速度。

[0098] M4) 执行 A* 算法, 得到各无人机下一步航路 $(x_i^{(p)}, y_i^{(p)})$ 。

[0099] M5) 判断是否满足避撞约束。

[0100] 计算

$$[0101] \quad d = \sqrt{(x_1^{(p)} - x_2^{(p)})^2 + (y_1^{(p)} - y_2^{(p)})^2}$$

[0102] 其中, $(x_1^{(p)}, y_1^{(p)})$ 和 $(x_2^{(p)}, y_2^{(p)})$ 是任意相邻两架无人机的实时位置坐标。

[0103] 如果 $d \leq d'_{\min}$, 两架无人机在遵循最大航迹倾斜角约束和不进入障碍区域的前提下, 向增大两机距离的方向各运动一个路径步长, 转到 M2) ; 否则转到 M6) ;

[0104] M6) 判断是否满足通信距离限制。

[0105] 如果 $d \geq d'_{\max}$, 两架无人机在遵循最大航迹倾斜角约束和不进入障碍区域的前提下, 向减小两机距离的方向各运动一个路径步长, 转到 M2) ; 否则转到 M7) ;

[0106] M7) 判断是否到达目标点。

[0107] 如果 $(x_i^{(p)}, y_i^{(p)}) = (80, 20)$, 仿真结束, 否则转到 M4)。

[0108] 在 Windows XP 环境下, 使用 Visual C++6.0 软件仿真的结果如附图 5 到附图 8 所示。其中, 附图 5 是未加通信约束时规划出的多无人机协同实时航路, 附图 6 是在附图 5 的基础上加了通信距离限制后规划出的多无人机协同实时航路, 附图 7 是在附图 6 的基础上加了通信时间延迟为 5s 后规划出的多无人机协同实时航路, 附图 8 是通信延迟时间为 10s 的情况。

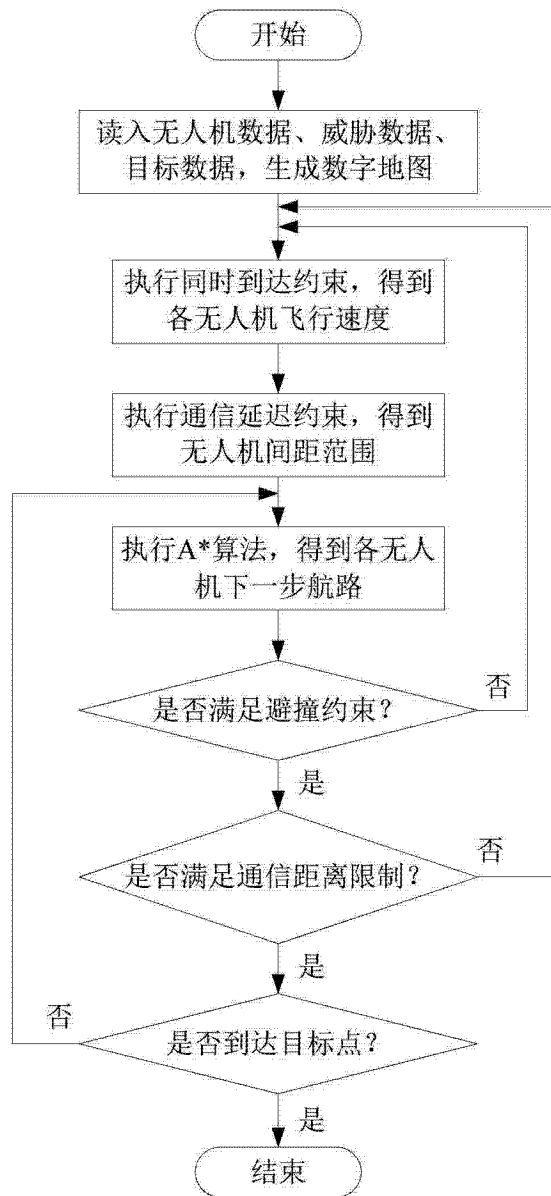


图 1

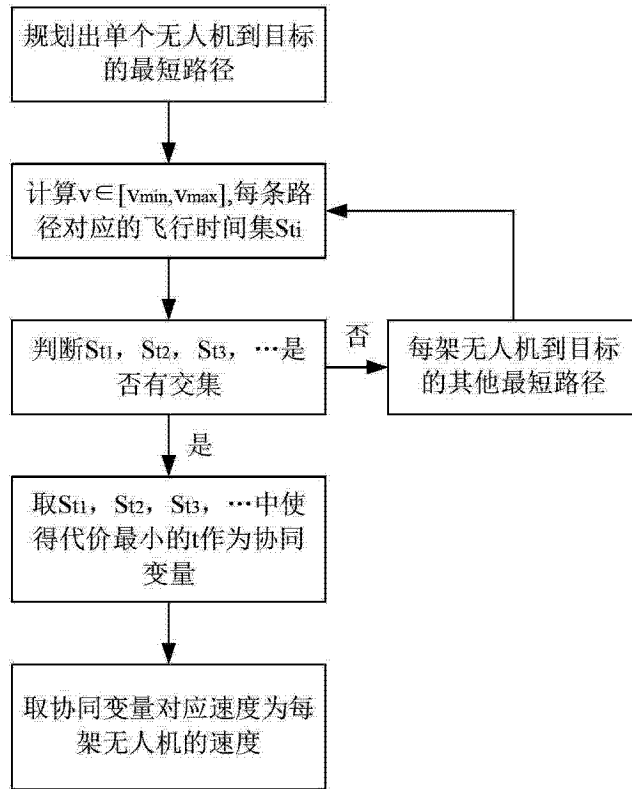


图 2

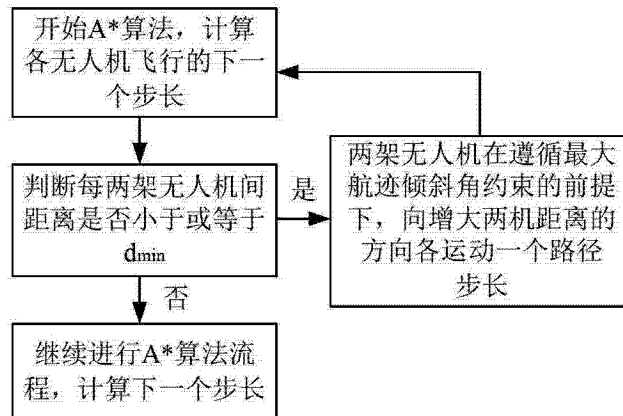


图 3

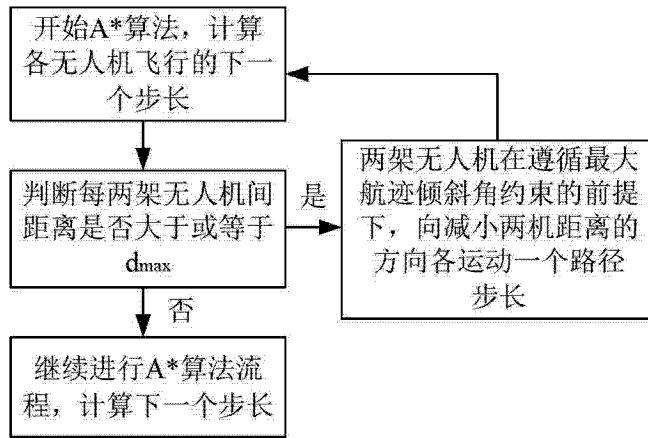


图 4

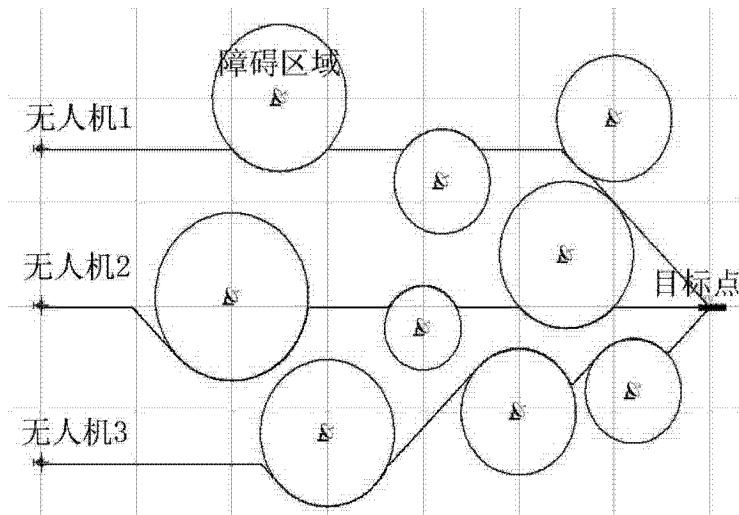


图 5

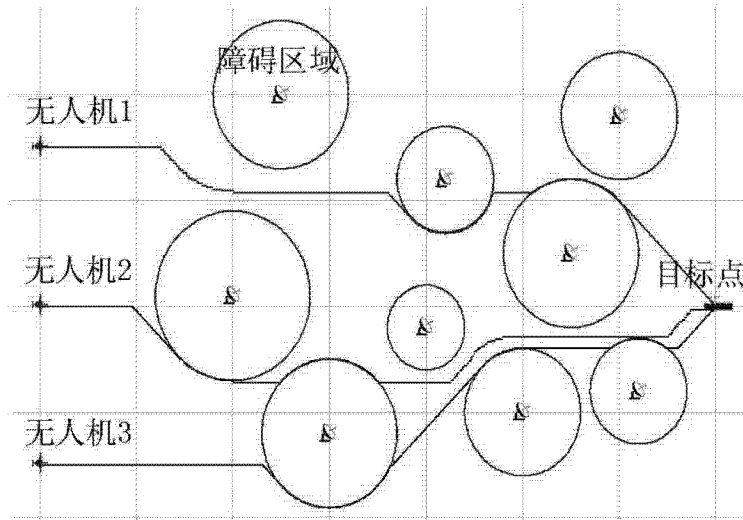


图 6

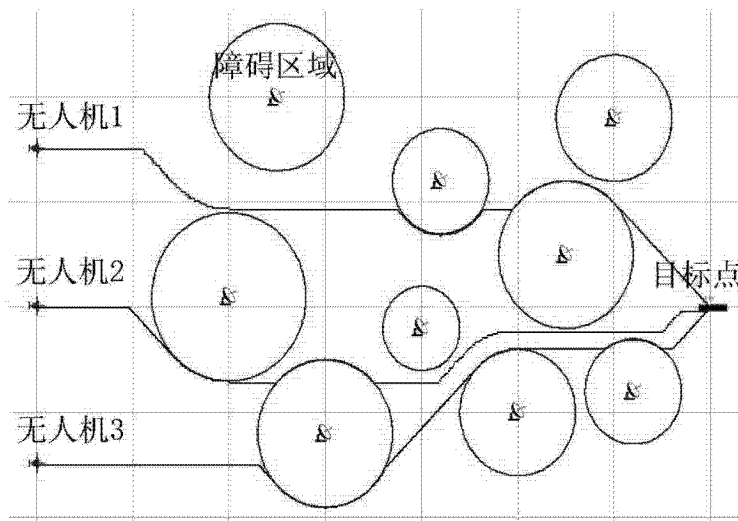


图 7

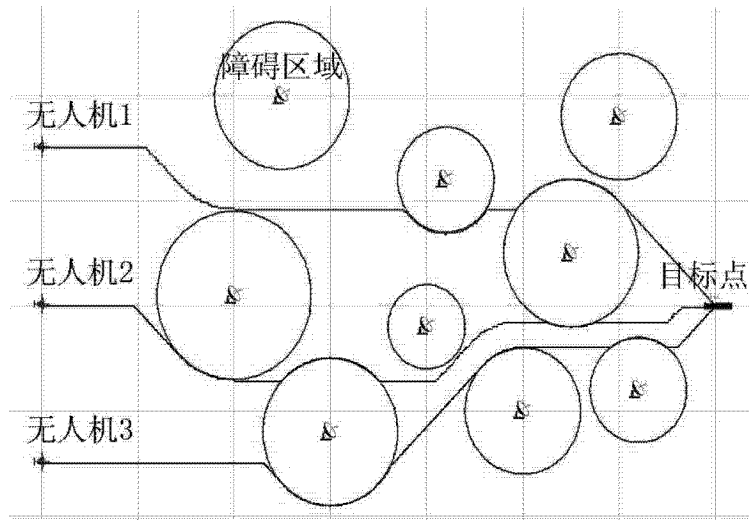


图 8