

# 中国矿业大学计算机学院

## 2019 级本科生课程报告

课程名称 文献检索与学术写作

报告时间 2021.10.17

学生姓名 李 春 阳

学 号 10193657

专 业 信息安全

任课教师 李 鸣

任课教师评语

任课教师评语

| 考查点               | 27-30                                  | 24-26                                      | 21-25  | 18-20  | 0-17                                      | 得分 |
|-------------------|--|--|--|--|---|----|
| 文献的新旧程度；是否有抄袭     | 对所查询的研究者的研究进行了详细的综述，并给出了该研究者所研究领域的热点问题 | 对所查询的研究者的研究进行了详细的综述，或给出了该研究者所研究领域的热点问题     | 对所查询的研究者的研究进行了的综述，或给出了该信息安全研究领域的热点问题         | 给出了一个信息安全研究方向的一篇文章；存在少量原文抄袭或直接抄袭现象             | 给出了一个信息安全方向的一篇文章;存在大面积大段原文抄袭或直接抄袭现象       |    |
| 报告内容是否完整，格式是否符合要求 | 报告篇幅不少于5页；内容从标题到参考文献完整；格式符合《通信学报》要求    | 报告篇幅不少于5页；内容从标题到参考文献基本完整；格式有不符合《通信学报》要求的地方 | 报告篇幅不少于5页；内容从标题到参考文献不够完整；格式有较多不符合《通信学报》要求的地方 | 报告篇幅 5 页左右；内容从标题到参考文献有所欠缺；格式存在大量不符合《通信学报》要求的地方 | 报告篇幅少于 5 页；内容从标题到参考文献缺失严重；格式严重不符合《通信学报》要求 |    |
| 总分（60 分）          |  |  |  |  |   |    |

# 基于人工水流思想的无人机三维路径规划

李春阳<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学, 计算机科学与技术学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 针对无人机三维路径规划, 建立环境数学模型和以障碍物为中心的相对运动坐标系。本文提出一种改进的人工水流算法。建立了带干扰项的环境模型, 设计了新的切向向量并引入了安全距离因子, 给出了可根据环境进行选择的启发因子, 从而有效地提高了无人机三维路径规划的有效性和安全性。仿真结果表明, 改进后的算法所规划出的路径更短, 更安全。

**关键词:** 无人机; 三维路径规划; 人工水流; 启发因子

中图分类号: TN911.72

文献标识码: A

文章编号: 1674358X(2020)040038--10

网络出版地址: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20213657

## Application of Artificial Water Flow Idea in Three-dimensional Path Planning of UAV

Li Chunyang<sup>1</sup>

1. School of Computer Science and Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu, 221116, China

**Abstract:** For UAV three-dimensional path planning, an environmental mathematical model and a relative motion coordinate system centered on obstacles are established. This paper proposes an improved artificial water flow algorithm. Firstly, an environmental model with interference items is established, a new tangential vector is designed and a safety distance factor is introduced, and then the heuristic factors that can be selected according to the environment are given, so that the effectiveness and safety of UAV three-dimensional path planning are effectively improved. The simulation results show that the path planned by the improved algorithm is shorter and safer.

**Key words:** UAV; three-dimensional path planning; artificial fluid method; heuristic factor.

### 1 引言

无人机三维路径规划指的是无人机在不与障碍物发生碰撞的前提下, 规划出一条从起点到目标点的最优路径。这是无人机研究领域的一项关键技术<sup>[1-3]</sup>。

无人机三维路径规划需要满足以下条件:

- 1) 安全性, 无人机可以避开所有障碍物;
- 2) 可行性, 在可控的前提下, 路径规划需要满足约束条件;
- 3) 最优性, 最优路径要使代价方程达到最小值;
- 4) 高效性, 算法的复杂程度不能超过处理器

的计算范围<sup>[4-7]</sup>。

目前, 国内外学者对无人机路径规划做了大量研究<sup>[8-14]</sup>, 三维空间中的无人机路径规划方法有人工势场法<sup>[15]</sup>、快速探索随机树法<sup>[16]</sup>、模糊算法<sup>[17]</sup>、粒子群优化<sup>[18]</sup>等。但是这些算法都有一定的局限性: 人工势场法和粒子群优化可能陷入局部最优; 快速探索随机树法随着飞行空间的扩大, 计算量呈指数增长。

韩学东等<sup>[16]</sup>提出了一种人工水流法, Yao 等<sup>[17-18]</sup>提出的受扰流体法的基本理论和模型。本文是在人工水流法的基础上, 设计了新的切向向量并引入了安全距离, 且启发因子可根据环境进行选择, 从而提高了三维路径规划的有效性和安全性。

收稿日期: 2021年10月1日; 修回日期: 2021年10月2日;

基金项目: 江苏省大学生创新创业训练计划项目(202010290131Y); 江苏省大学生创新创业训练计划项目(202110290173Y); 江苏省大学生创新创业训练计划项目(202110290068Z);

## 2 人工水流法的基本理论与模型构建

### 2.1 障碍物建模

人工水流法是来源于自然界流水流动时能绕开石块等障碍物的启发: 自然界的水流在流淌过程中, 如果没有任何阻拦物体, 水将直流而去; 如果有障碍物存在, 那么水流将绕开障碍物继续前进。

为了简化算法, 将每个障碍物近似描述为常见模型, 例如一座山相当于一个圆锥体, 高层建筑可以看作是一个圆锥体, 即依据障碍物的形状不同, 分别简化视为圆锥、半球和圆柱等。建立三维坐标系  $o-xyz$ , 机器人位置所在点  $\xi = (x, y, z)$ , 凸面体所在中心为  $\xi_0 = (x_0, y_0, z_0)$ , 各轴所在长度为  $a, b, c$ , 指标参数为  $d, e, f$  之后建立函数

$$F(\xi) = \left( \frac{(x-x_0)}{a} \right)^{2d} + \left( \frac{(y-y_0)}{b} \right)^{2e} + \left( \frac{(z-z_0)}{c} \right)^{2f} \quad (1)$$

参数  $a, b, c, d, e, f$  决定着障碍物的形状和大小: 当  $a=b=c$  且  $d=e=f=1$  时, 障碍物是一个球; 当且  $d=e=1, 0 < f < 1$  时, 障碍物可视为圆锥; 当  $a, b$  满足条件  $a=b=(R_1-R_2)\frac{z}{c}$  且  $d=e=1, f>1$  时, 障碍物近似为圆台, 其中  $R_1, R_2$  为两底半径。这样的合理简化障碍物的做法便于算法的实现。

### 2.2 人工水流建模

如果在飞行环境中没有障碍物, 无人机将沿一条直线路径, 以恒定的速度从出发点直接飞向目标点。不妨假设目标点为  $\xi_d = (x_d, y_d, z_d)$ , 无人机恒定的速度为  $C$ , 进而原始流体的速度可定义为

$$v(\xi) = \left[ \frac{C(x-x_d)}{d(\xi)}, \frac{C(y-y_d)}{d(\xi)}, \frac{C(z-z_d)}{d(\xi)} \right]^T \quad (2)$$

此处  $d(\xi) = \sqrt{(x-x_d)^2 + (y-y_d)^2 + (z-z_d)^2}$  为  $\xi$  与  $\xi_d$  的距离。

### 2.3 扰动流体建模

当飞行环境中出现障碍物时, 会对原始流体产生影响, 这个影响可以量化为扰动矩阵  $P(\xi)$ 。将扰动矩阵作用在原始流体的速度  $v(\xi)$  上, 即可得到扰动流体的速度:

$$v_p(\xi) = P(\xi)v(\xi) \quad (3)$$

扰动矩阵  $P(\xi)$  将在 2.4 中给出定义。因此, 在给定时间间隔  $\Delta t$  的情况下, 下一时刻的位置

$$\xi_{\text{next}} = \xi + v_p(\xi)\Delta t \quad (4)$$

这样从初始点经过一系列迭代, 可得到一组由初始点到目标点的点列  $\{\xi_k\}$ , 即为规划出来的路径。

### 2.4 单个障碍物的路径规划

假设无人机的初始点为  $\xi_s = (x_s, y_s, z_s)^T$ , 将扰动矩阵  $P(\xi)$  定义为

$$P(\xi) = I - \frac{n(\xi)n(\xi)^T}{|F(\xi)| \frac{1}{\rho(\xi)} \|n(\xi)\|^2} + \frac{\tau t(\xi)n(\xi)^T}{|F(\xi)| \frac{1}{\sigma(\xi)} \|t(\xi)\| \|n(\xi)\|} \quad (5)$$

此处  $I$  为一个  $3 \times 3$  单位矩阵,  $n(\xi)$  是法向量,  $t(\xi)$  为切向量,  $\tau$  是定义切向量的饱和度函数;  $\| \cdot \|$  是矩阵或向量的 2-范数。此外,  $\rho(\xi)$  和  $\sigma(\xi)$  可决定  $n(\xi)$  和  $t(\xi)$  的大小。  $n(\xi), t(\xi), \rho(\xi), \sigma(\xi)$  和  $\tau$  分别定义如下:

$$n(\xi) = \left[ \frac{\partial F(\xi)}{\partial x}, \frac{\partial F(\xi)}{\partial y}, \frac{\partial F(\xi)}{\partial z} \right]^T \quad (6)$$

$$t(\xi) = \left[ \frac{\partial F(\xi)}{\partial y}, -\frac{\partial F(\xi)}{\partial x}, 0 \right]^T \quad (7)$$

$$\rho(\xi) = \rho_0 \exp \left( 1 - \frac{1}{d_0(\xi)d(\xi)} \right) \quad (8)$$

$$\sigma(\xi) = \sigma_0 \exp \left( 1 - \frac{1}{d_0(\xi)d(\xi)} \right) \quad (9)$$

$$\tau = \begin{cases} 1, & \mathbf{v}(\xi)^T \mathbf{t}(\xi) \mathbf{n}(\xi)^T \mathbf{v}(\xi) > \varepsilon \\ \frac{\mathbf{v}(\xi)^T \mathbf{t}(\xi) \mathbf{n}(\xi)^T \mathbf{v}(\xi)}{\varepsilon}, & -\varepsilon \leq \mathbf{v}(\xi)^T \mathbf{t}(\xi) \mathbf{n}(\xi)^T \mathbf{v}(\xi) \leq \varepsilon \\ -1, & \mathbf{v}(\xi)^T \mathbf{t}(\xi) \mathbf{n}(\xi)^T \mathbf{v}(\xi) < -\varepsilon \end{cases} \quad (10)$$

此处  $\rho_0$  是排斥系数,  $\sigma_0$  是切向系数,  $d_0(\xi)$  是障碍物边界和当前位置  $\xi$  的距离,  $\varepsilon$  是饱和函数  $\tau$  的一个小的正阈值。

### 2.5 多个障碍物的路径规划

不妨假设在飞行环境中共有  $K$  个障碍物, 第  $k$  个障碍物中心的位置为  $\xi_{0,k} = (x_{0,k}, y_{0,k}, z_{0,k})^T$ , 障碍物对应的参数为  $a_k, b_k, c_k, d_k, e_k, f_k$ , 则第  $k$  个障碍物的方程可记为  $F_k(\xi) = 1$ 。其余参数定义如下:  $\rho_{0,k}$  为斥力参数,  $\sigma_{0,k}$  为正切参数,  $n_k(\xi)$  为法向量,  $t_k(\xi)$  为切向向量,  $\tau_k$  为切向向量的饱和函数,  $\rho_k(\xi), \sigma_k(\xi), sf_k \in \{0, 1\}$  为水流参数。通过这些参数, 应用公式 (5) 可定义该障碍物的扰动矩阵  $P_k(\xi)$ 。进而, 第  $k$  个障碍物的扰动权值  $\omega_k(\xi)$  可定

义为

$$\omega_k(\xi) = \prod_{i=1, i \neq k}^K \frac{F_i(\xi) - 1}{(F_k(\xi) - 1) + (F_i(\xi) - 1)} \quad (11)$$

可以证明  $\sum_{i=1}^K \omega_i(\xi) \leq 1$ , 故标准化处理后的权值

$\tilde{\omega}_k(\xi)$  定义为

$$\tilde{\omega}_k(\xi) = \frac{\omega_k(\xi)}{\sum_{i=1}^K \omega_i(\xi)} \quad (12)$$

因此, 扰动矩阵  $P(\xi)$  定义为

$$\mathbf{P}(\xi) = \sum_{k=1}^K \tilde{\omega}_k(\xi) P_k(\xi) \quad (13)$$

### 3 改进型人工水流法

在原始的人工水流法路径规划中, 切向向量  $\mathbf{t}(\xi) = [t_1(\xi), t_2(\xi), t_3(\xi)]^T$  的定义如下

$$\mathbf{t}(\xi) = \left[ \frac{\partial F(\xi)}{\partial y}, -\frac{\partial F(\xi)}{\partial x}, 0 \right]^T \quad (14)$$

该向量是在与法向量  $\mathbf{n}(\xi)$  垂直的切平面上选择的: 取  $t_3(\xi) = 0$ , 即在  $z$  轴上分量为零, 使切向向量  $\mathbf{t}(\xi)$  与  $o-xy$  平面平行. 这样选择的切向向量  $\mathbf{t}(\xi)$ , 只对无人机在水平平面上的转向产生作用, 使无人机可以延障碍物的侧面绕过障碍物, 十分符合自然界中水流的特性.

但是, 在实际的路径规划中, 无人机是可以垂直飞行的, 即无人机可以攀升一定的高度, 从障碍物的上方飞过, 而不是仅仅按照水流的特性, 只能从侧面绕过障碍物. 因此, 不必取  $t_3(\xi) = 0$ . 对此, 综合考虑路径长度与攀升的难度, 本文重新定义切向向量为  $T(\xi)$ , 并在此基础上进行推导与仿真实验.

#### 3.1 改进 1: 航程最短切向向量

若无人机在当前位置  $\xi$  受到障碍物影响产生扰动, 则可准确求得该处的法向量  $\mathbf{n}(\xi)$  以及与法向量  $\mathbf{n}(\xi)$  垂直的切平面  $\alpha$ . 通过分析, 切向向量  $\mathbf{t}(\xi)$  与原始速度  $\mathbf{v}(\xi)$  的夹角越小, 则切向向量  $\mathbf{t}(\xi)$  在原始速度  $\mathbf{v}(\xi)$  方向上的分量越大, 则无人机可以更快地飞向目标点, 从而使航程趋向最短. 因此, 重新定义切向向量  $\mathbf{t}_{\text{new}}(\xi)$  如下

$$\mathbf{t}_{\text{new}}(\xi) = \begin{cases} \arg \min_{\mathbf{t}, \langle \mathbf{v}(\xi), \mathbf{t} \rangle = 0} \{ \cos \langle \mathbf{v}(\xi), \mathbf{t} \rangle \}, & \mathbf{v}(\xi) \neq \omega \cdot \mathbf{n}(\xi) \\ \mathbf{t}(\xi), & \mathbf{v}(\xi) = \omega \cdot \mathbf{n}(\xi) \end{cases} \quad (15)$$

其中  $\langle \mathbf{v}(\xi), \mathbf{t} \rangle$  表示原始速度  $\mathbf{v}(\xi)$  与向量  $\mathbf{t}$  的夹角  $\omega$  是一个常数.

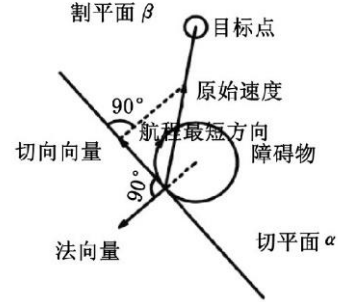


图 1 航程最短切向向量示意图

当  $\mathbf{v}(\xi) = \omega \cdot \mathbf{n}(\xi)$  时, 即原始速度  $\mathbf{v}(\xi)$  与法向量  $\mathbf{n}(\xi)$  共线, 此时切平面  $\alpha$  上的任意方向都是航程最短的方向, 故选取水平方向上的切向向量  $\mathbf{t}(\xi)$ .

如图 1 所示, 当  $\mathbf{v}(\xi) \neq \omega \cdot \mathbf{n}(\xi)$  时, 新定义的切向向量  $\mathbf{t}_{\text{new}}(\xi)$  的方向为原始速度  $\mathbf{v}(\xi)$  在切平面  $\alpha$  上的垂直投影. 取过无人机当前位置  $\xi$ 、障碍物中心  $\xi_0$  与目标点  $\xi_d$  三点的割平面  $\beta$ , 切平面  $\alpha$  与割平面  $\beta$  的交线  $l$  的方向即为想要选取的切向向量  $\mathbf{t}_{\text{new}}(\xi)$ . 新定义的切向向量  $\mathbf{t}_{\text{new}}(\xi)$  的求解方法为: 已知原始速度  $\mathbf{v}(\xi)$  与法向量  $\mathbf{n}(\xi)$  的定义,

$$\mathbf{v}(\xi) = \left[ C \frac{x - x_d}{d(\xi)}, C \frac{y - y_d}{d(\xi)}, C \frac{z - z_d}{d(\xi)} \right]^T = [v_1, v_2, v_3]^T \quad (16)$$

$$\mathbf{n}(\xi) = \left[ \frac{\partial F(\xi)}{\partial x}, \frac{\partial F(\xi)}{\partial y}, \frac{\partial F(\xi)}{\partial z} \right]^T = [n_1, n_2, n_3]^T \quad (17)$$

则切平面  $\alpha$  的法向为法向量  $\mathbf{n}(\xi)$ . 由于原始速度  $\mathbf{v}(\xi)$  与法向量  $\mathbf{n}(\xi)$  都在割平面  $\beta$  内, 故割平面  $\beta$  的法向  $\mathbf{n}_\beta(\xi)$  为

$$\begin{aligned} \mathbf{n}_\beta(\xi) &= \mathbf{v}(\xi) \times \mathbf{n}(\xi) = \begin{bmatrix} v_2 & v_3 \\ n_2 & n_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} v_3 & v_1 \\ n_3 & n_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_2 n_3 - v_3 n_2 & v_3 n_1 - v_1 n_3 & v_1 n_2 - v_2 n_1 \end{bmatrix}^T \\ &= [n_{\beta 1}, n_{\beta 2}, n_{\beta 3}]^T, \end{aligned} \quad (18)$$

从而新定义的切向向量  $\mathbf{t}_{\text{new}}(\xi)$  可由下式求得

$$\mathbf{t}_{\text{new}}(\xi) = \mathbf{n}_\beta(\xi) \times \mathbf{n}(\xi) = \begin{bmatrix} n_{\beta 2} & n_{\beta 3} \\ n_2 & n_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} n_{\beta 3} & n_{\beta 1} \\ n_3 & n_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_{\beta 1} & n_{\beta 2} \\ n_1 & n_2 \end{bmatrix}^T \quad (19)$$

这是因为由公式(19)得到的切向向量  $\mathbf{t}_{\text{new}}(\xi)$  既满足  $\mathbf{t}_{\text{new}}(\xi) \perp \mathbf{n}_\beta(\xi)$ , 又满足  $\mathbf{t}_{\text{new}}(\xi) \perp \mathbf{n}(\xi)$ , 故切向

向量  $t_{\text{new}}(\xi)$  所在方向既包含于切平面  $\alpha$ ，又包含于割平面  $\beta$ ，故为交线  $l$  的方向。

### 3.2 改进 2：带攀升力的切向向量

在 3.1 中，只考虑了让航程趋于最短，并没有考虑的无人机的攀升性能等因素，因此存在一些缺陷。为了充分考虑无人机的性能，防止无人机因攀升能力不足而无法沿规划出来的路径飞行，本文提出改进的切向向量  $T(\xi)$ ，其定义如下：

$$T(\xi) = \lambda_1 \frac{t(\xi)}{\|t(\xi)\|} + \lambda_2 \frac{t_{\text{new}}(\xi)}{\|t_{\text{new}}(\xi)\|} \quad (20)$$

其中， $t(\xi) = \left[ \frac{\partial F(\xi)}{\partial y}, -\frac{\partial F(\xi)}{\partial x}, 0 \right]^T$  为原始的切向向量， $t_{\text{new}}(\xi)$  为 3.1 中重新定义的切向向量， $\lambda_1, \lambda_2$  为启发因子，由无人机的性能决定， $\frac{\lambda_1}{\lambda_2}$  为比例系数。

进一步，扰动矩阵  $P(\xi)$  定义为

$$P(\xi) = I - \frac{n(\xi)n(\xi)^T}{|F(\xi)| \frac{1}{\rho(\xi)} \|n(\xi)\|^2} + \frac{\tau T(\xi)n(\xi)^T}{|F(\xi)| \frac{1}{\sigma(\xi)} \|T(\xi)\| \|n(\xi)\|} \quad (21)$$

由于

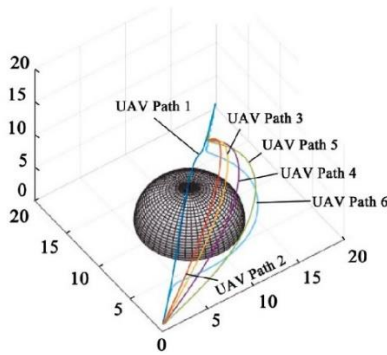


图 2 带攀升力的切向向量示意图 1

$$\begin{aligned} n(\xi)^T T(\xi) &= n(\xi)^T \left( \lambda_1 \frac{t(\xi)}{\|t(\xi)\|} + \lambda_2 \frac{t_{\text{new}}(\xi)}{\|t_{\text{new}}(\xi)\|} \right) \\ &= \lambda_1 \frac{n(\xi)^T t(\xi)}{\|t(\xi)\|} + \lambda_2 \frac{n(\xi)^T t_{\text{new}}(\xi)}{\|t_{\text{new}}(\xi)\|} = 0 \end{aligned} \quad (22)$$

故改进的切向向量  $T(\xi)$  依然与法向量  $n(\xi)$  垂直。其他定义与上文中相同，进而通过 2.3 中的迭代过程，可以规划出一条平滑的路径。

根据图 2 和图 3 的仿真结果和表 1 中的参数，发现随着比例系数  $\frac{\lambda_1}{\lambda_2}$  的增大，规划出来的路径趋于平缓，但路径的长度呈上升趋势：在 Path1 的情况下， $\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = 0$ ，路径垂直翻越了障碍物，达到了航程

最短；在 Path6 的情况下， $\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \infty$ ，路径几乎近似于水平，并且航程最长。除此之外，从 Path2 和 Path3 可以发现，Path3 不仅比 Path2 平缓，而且航程也比 Path2 短，因此可以得到以下结论：在满足无人机攀升性能的条件下，可以寻找最优的比例系数  $\frac{\lambda_1}{\lambda_2}$ ，使得规划出来的路径较短，又比较平缓。

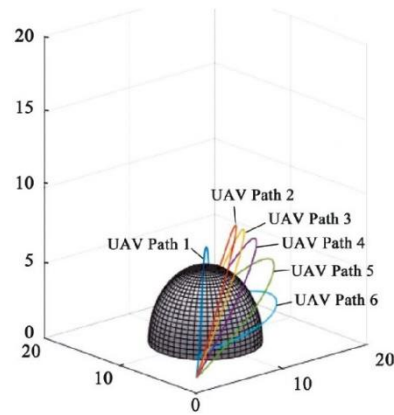


图 3 带攀升力的切向向量示意图 2

## 4 MATLAB 仿真

为了验证改进算法的可行性与有效性，使用 MATLAB 进行仿真实验。

假设无人机的起始位置是  $(0, 0, 0.5)$ ，目标点设置为  $(40, 40, 6)$ ，在飞行空间中共设置 7 个障

碍物，它们的参数如表 2。对每个障碍物，斥力参数  $\rho_0(\xi) = 1$ ，切向参数  $\sigma_0(\xi) = 1$ 。图 4 为算法流程图。经过程序运行，得到的仿真图如图 5 和图 6。原始人工水流法规划出的路径长度为 65.98288，改进算法规划出的路径长度为 64.38021。

表格 1 参数表

| 路径    | $\lambda_1$ | $\lambda_2$ | $\frac{\lambda_1}{\lambda_2}$ | 长度       |
|-------|-------------|-------------|-------------------------------|----------|
| Path1 | 0           | 1           | 0                             | 31.70126 |
| Path2 | 1           | 120         | 1/120                         | 34.56935 |
| Path3 | 1           | 90          | 1/90                          | 34.41014 |
| Path4 | 1           | 60          | 1/60                          | 34.66941 |
| Path5 | 1           | 30          | 1/30                          | 35.03911 |
| Path6 | 1           | 0           | $\infty$                      | 36.91418 |

表格 2 障碍物参数表

| 障碍物 | 信息 |             |               |           |
|-----|----|-------------|---------------|-----------|
|     | 形状 | 中心          | $a, b, c,$    | $d, e, f$ |
| 1   | 球  | (6, 9, 0)   | 5.0, 5.0, 5.0 | 1, 1, 1   |
| 2   | 球  | (28, 9, 0)  | 4.5, 4.5, 4.5 | 1, 1, 1   |
| 3   | 球  | (22, 17, 0) | 5.0, 5.0, 5.0 | 1, 1, 1   |
| 4   | 球  | (20, 20, 0) | 6.0, 6.0, 6.0 | 1, 1, 1   |
| 5   | 圆锥 | (15, 10, 0) | 4.0, 3.0, 6.0 | 1, 1, 0.3 |
| 6   | 圆锥 | (30, 35, 0) | 3.0, 3.0, 6.0 | 1, 1, 0.4 |
| 7   | 圆锥 | (28, 30, 0) | 3.8, 3.8, 8.0 | 1, 1, 10  |

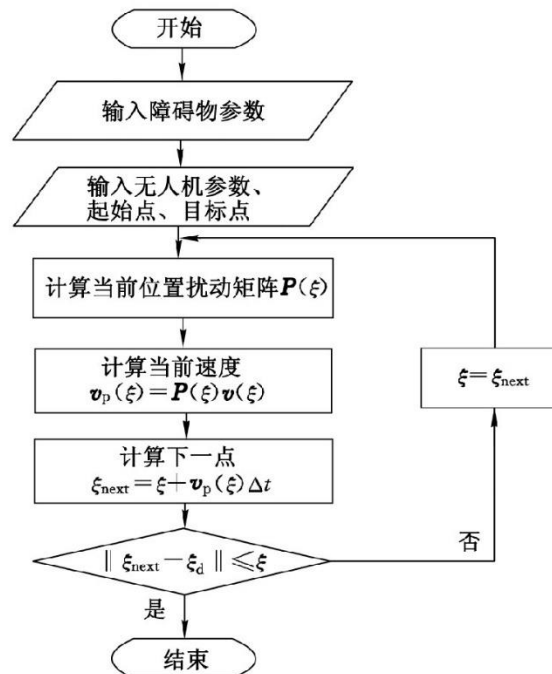


图 4 算法流程图

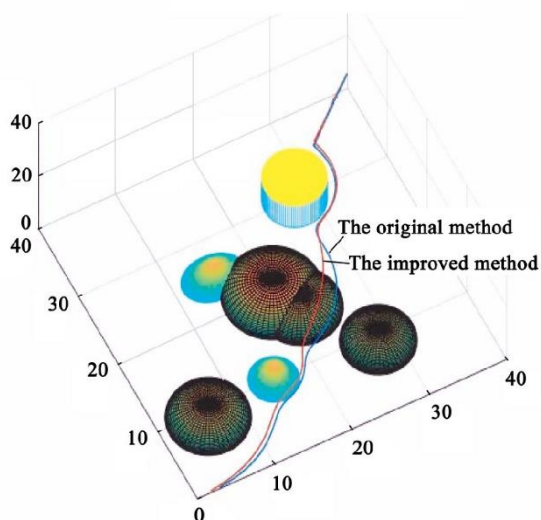


图 5 路径对比图 1

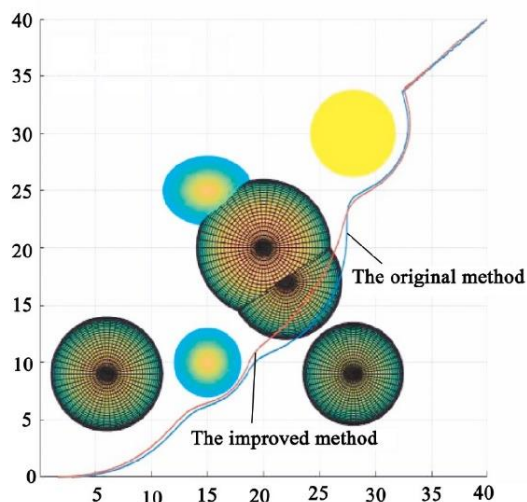


图 6 路径对比图 2

从图 5 和图 6 中可以看出,原始的扰动流体法和改进的算法都避开了所有障碍物,顺利到达目标点.在障碍物 3 附近,由于原始扰动流体法的切向向量  $t(\xi)$  与  $o-xy$  平面平行,导致路径从障碍物 3 侧面绕过;改进算法规划出的路径则从障碍物 3 上方越过,因此航程较短.图 7 是两条路径的高度曲线,改进算法规划出路径的海拔高于原始扰动流体法,其在 (24, 23, 15, 95, 6, 97) 处达到海拔的最高值 6.97.在此高度,避免了部分下方障碍物的影响,无人机在飞行期间也更安全.

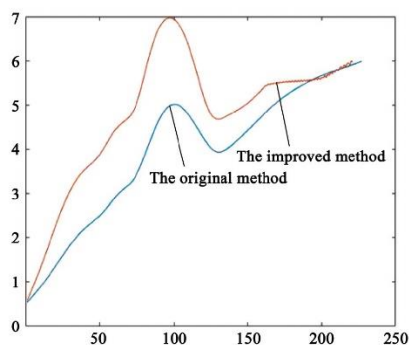


图 7 高度曲线

## 5 结语

本文基于改进的人工水流算法,研究无人机的三维路径规划.建立了带干扰项的环境模型,设计了新的切向向量并引入了安全距离因子,并给出了可根据环境进行选择的启发因子,使无人机可以自主逃离陷阱区域,有效地提高了无人机三维路径规划的有效性和安全性.在理论研究的基础上,通过 MATLAB 进行仿真实验,验证了算法的可行性.

## 参考文献

- [1] 代君,管宇峰,任淑红.多旋翼无人机研究现状与发展趋势探讨[J].赤峰学院学报(自然科学版),2016,32(16):22-24.  
Dai Jun, Guan Yufeng, Ren Shuhong. Research status and development trend of multi-rotor UAV[J]. Journal of Chifeng University (Natural Science Edition), 2016, 32(16): 22-24.
- [2] Witold Artur Klimczyk and Zdobyslaw Jan Goraj. Robust design and optimization of UAV empennage[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2017, 89(4): 609-619.
- [3] Shaofei Chen et al. Penetration trajectory planning based on radar tracking features for UAV[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal, 2013, 85(1): 62-71.
- [4] Madhavan Shanmugavel, Antonios Tsourdos, Brian White, Rafał Żbikowski, Co-operative path planning of multiple UAVs using Dubins paths with clothoid arcs, Control Engineering Practice, Volume 18, Issue 9, 2010, Pages 1084-1092, ISSN 0967-0661, <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2009.02.010>.
- [5] 杨岱川,文成林.基于蚁群和改进PRM算法的多目标点路径规划[J].杭州电子科技大学学报(自然科学版),2017,37(03):63-67.  
Yang Daichuan, Wen Chenglin. Multi-target path planning based on ant colony and improved PRM algorithm[J]. Journal of Hangzhou Dianzi University (Natural Science Edition), 2017, 37(03): 63-67.
- [6] Hee Rak Beom and Hyung Suck Cho, "A sensor-based navigation for a mobile robot using fuzzy logic and reinforcement learning," in IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 25, no. 3, pp. 464-477, March 1995, doi: 10.1109/21.364859.
- [7] 郁磊,史峰,王辉等. MATLAB 智能算法 30 个案例分析[M]. 2 版. 北京:北京航空航天大学出版社, 2015  
Yu Lei, Shi Feng, Wang Hui and others. Analysis of 30 Cases of MATLAB Intelligent Algorithm [M]. 2



- Edition. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2015
- [8] 张鹏彬, 曾钰培. 改进人工势场法的移动机器人路径规划[J]. 机器人技术与应用, 2018(03): 27-29.  
Zhang Pengbin, Zeng Yupei. Improved artificial potential field method for mobile robot path planning[J]. Robotics and Applications, 2018(03): 27-29.
- [9] 刘成菊, 韩俊强, 安康. 基于改进 RRT 算法的 RoboCup 机器人动态路径规划[J]. 机器人, 2017, 39(01): 8-15.  
Liu Chengju, Han Junqiang, Ankang. RoboCup robot dynamic path planning based on improved RRT algorithm[J]. Robot, 2017, 39(01): 8-15.
- [10] 林娜, 刘二超. 基于改进蚁群算法的无人机动态航路规划[J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(03): 149-153.  
Lin Na, Liu Erchao. UAV dynamic route planning based on improved ant colony algorithm[J]. Computer Measurement and Control, 2016, 24(03): 149-153.
- [11] 段建民, 陈强龙. 基于改进人工势场-遗传算法的路径规划算法研究[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(03): 19-24.  
Duan Jianmin, Chen Qianglong. Research on path planning algorithm based on improved artificial potential field-genetic algorithm[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2019, 38(03): 19-24
- [12] Yonghui Li, Huaxi Gu, Fault tolerant routing algorithm based on the artificial potential field model in Network-on-Chip, Applied Mathematics and Computation, Volume 217, Issue 7, 2010, Pages 3226-3235, ISSN 0096-3003, <https://doi.org/10.1016/j.amc.2010.08.055>.
- [13] Wei, K.; Ren, B. A Method on Dynamic Path Planning for Robotic Manipulator Autonomous Obstacle Avoidance Based on an Improved RRT Algorithm. Sensors 2018, 18, 571. <https://doi.org/10.3390/s18020571>
- [14] 巴海涛. 无人机航迹规划研究[D]. 西北工业大学, 2006.  
Ba Haitao. Research on UAV trajectory planning[D]. Northwestern Polytechnical University, 2006.
- [15] 陈洋, 赵新刚, 韩建达. 移动机器人 3 维路径规划方法综述[J]. 机器人, 2010, 32(04): 568-576.  
Chen Yang, Zhao Xingang, Han Jianda. Overview of 3D path planning methods for mobile robots [J]. Robot, 2010, 32(04): 568-576.
- [16] 韩学东, 洪炳镨, 孟伟. 一种新型的路径规划方法——人工水流法[J]. 高技术通讯, 2004(4): 53-57.  
Han Xuedong, Hong Bingrong, Meng Wei. A new type of path planning method—artificial water flow method[J]. High Technology Communications, 2004(4): 53-57.
- [17] Peng Yao and Honglun Wang and Zikang Su. UAV feasible path planning based on disturbed fluid and trajectory propagation[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2015, 28(4): 1163-1177.
- [18] 王宏伦, 吕文涛, 刘畅, 等. 一种基于扰动流体动态系统的无人机三维航路规划方法: CN103713642A[P]. 2014.  
Wang Honglun, Lu Wentao, Liu Chang, et al. A three-dimensional route planning method for UAV based on disturbance fluid dynamic system: CN103713642A[P]. 2014.

#### 作者简介



**李春阳** 男, 2001 年 2 月出生, 本科学士, 主要研究方向为信息安全, 密码学, 深度学习, 路径规划; 主持参与国家级大创 1 项, 省级大创 2 项; 参与发表论文 2 篇。

**E-mail:** lichunyang5037@163.com