

引用格式: 丁力, 柴华伟, 李兴成. 基于航迹规划的四旋翼飞行器轨迹跟踪控制[J]. 电光与控制, 2018, 25(11): 30-35. DING L, CHAI H W, LI X C. Trajectory tracking control of a quadrotor based on path planning[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(11): 30-35.

## 基于航迹规划的四旋翼飞行器轨迹跟踪控制

丁力<sup>1,2</sup>, 柴华伟<sup>1</sup>, 李兴成<sup>1</sup>

(1. 江苏理工学院机械工程学院, 江苏 常州 213001; 2. 香港理工大学工业及系统工程学系, 香港 999077)

**摘要:** 针对四旋翼飞行器提出了一种基于改进人工蜂群算法的三维航迹规划算法和基于线性自抗扰控制的轨迹跟踪控制策略, 以提高四旋翼飞行器在城市中的自主飞行能力。在实际应用中, 四旋翼的自主飞行必须考虑其飞行动力学特性。首先, 利用牛顿-欧拉法推导四旋翼的飞行动力学模型, 并建立障碍物模型与航迹代价模型; 然后, 引入人工蜂群算法来处理四旋翼的航迹规划, 并采用自适应策略、新的概率选择方式及立方混沌搜索算子来提高其性能; 最后, 根据时间尺度原理将四旋翼的动力学模型分为位置与姿态两个控制环, 并分别设计二阶线性自抗扰控制器来实现其轨迹跟踪。仿真结果表明, 所提出的方法可为四旋翼规划出一条平滑可飞的航迹, 并且能够有效抑制外界扰动, 实现各控制环状态变量的稳定控制。

**关键词:** 四旋翼飞行器; 线性自抗扰控制; 航迹规划; 人工蜂群算法; 飞行动力学

中图分类号: V275+.1; TP273 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2018.11.006

## Trajectory Tracking Control of a Quadrotor Based on Path Planning

DING Li<sup>1,2</sup>, CHAI Hua-wei<sup>1</sup>, LI Xing-cheng<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China;

2. Department of Industrial and System Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China)

**Abstract:** A 3D path planning algorithm based on the improved artificial bee colony algorithm and a trajectory tracking control strategy based on linear active disturbance rejection control are proposed for the quadrotor, so as to improve its ability of autonomous flight in the city area. In practical applications, UAV's autonomous flight should take its flight dynamics into consideration. Firstly, the flight dynamical model of the quadrotor is deduced by using Newton-Euler equation. Meanwhile, the obstacle model and the cost function of the flight path are set up. Then, the artificial bee colony algorithm is introduced to deal with the 3D path planning of the quadrotor. The adaptive search strategy, a novel probability selection strategy and the cubic chaotic searching operator are adopted to improve the performance of the original algorithm. Lastly, the dynamical model of the quadrotor is divided into the position loop and the attitude loop according to the time scale principle, and the second-order linear active disturbance rejection controller is designed to realize its trajectory tracking. The simulation result indicates that the proposed method can work out a smooth path for the quadrotor, effectively compensate for external disturbances, and realize the steady control of state variables of each control loop.

**Key words:** quadrotor; linear active disturbance rejection control; path planning; artificial bee colony algorithm; flight dynamics

收稿日期: 2018-04-08

修回日期: 2018-05-02

**基金项目:** 国家自然科学基金(51405209); 江苏省基础研究计划(自然科学基金)资助项目(BK20170315); 常州市应用基础研究计划(CJ20179017)

**作者简介:** 丁力(1989—), 男, 江苏宜兴人, 博士, 讲师, 研究方向为机器人动力学与控制。

## 0 引言

随着机器人技术、控制技术、通信技术的发展, 四旋翼被广泛应用于生产生活, 如建筑现场测绘与管理、桥梁架线、电力巡线、地理建模等<sup>[1-2]</sup>。当四旋翼在城市中自主飞行时, 航迹规划与飞行控制是必不可少的

环节。然而与其他空中机器人一样,四旋翼具有强耦合、欠驱动、非线性的多输入多输出特性,要实现能够避障、高稳定性的飞行作业任务具有一定的难度。因此,开发高效率的航迹规划算法和高精度的飞行控制策略是工业领域和学术领域共同关注的热点。

对于航迹规划,很多学者仅简单地将无人机看作是一个质点,并采用智能算法对其进行航迹规划。例如,WANG 等<sup>[3]</sup>提出一种改进的 BA 算法来实现无人机的三维航迹规划,并在仿真环境下获得了平滑可飞的航迹;在处理编队无人机三维航迹规划时,YANG 等<sup>[4]</sup>采用自适应调整策略来改进 PSO 算法以避免陷入局部最优值,有效实现了无人机在三维空间中的编队飞行;SHORAKAEI 等<sup>[5]</sup>提出一种并行 GA 算法来规划无人机的二维航迹,改进算法可处理障碍物突变问题。但上述航迹规划过程忽略了无人机的飞行力学特性,像四旋翼的姿态角对阵风干扰、机械振动等极为敏感,微小的扰动就可能会导致坠机。因此,四旋翼的航迹规划必须考虑其飞行力学特性。

对于飞行控制策略的设计,常见的方法有 LQR 控制<sup>[6]</sup>、PID 控制<sup>[7]</sup>、 $H_\infty$  控制<sup>[8]</sup>等。近年来,学者们发现在稳定姿态控制的基础上,当四旋翼受到外界扰动时,其动力学模型也会发生改变。为此,所设计的控制算法必须能有效抑制未知扰动,并且具有一定的鲁棒性。例如:文献[9]提出了一种非线性自适应状态反馈控制器来补偿未知扰动,实现了四旋翼对“8”字型轨迹的跟踪;文献[10]利用扩张观测器实现对系统状态及集总干扰的准确估计,并设计级联式比例控制器保证四旋翼在低速条件下的稳定飞行。

本文另辟蹊径,针对四旋翼的航迹规划与飞行控制问题,提出了一种改进人工蜂群(IABC)算法来实现四旋翼在三维空间中的航迹规划,并引入 LADRC(Linear Active Disturbance Rejection Control)控制策略来设计其姿态镇定控制器。通过 IABC 算法可获得最优或次优的飞行航迹,若让四旋翼简单地跟踪这些离散航点,则整个飞行过程可被视作多个阶跃信号的跟踪。根据飞行力学理论可知,这样的跟踪方式并不能满足四旋翼飞行力学特性的要求(例如相邻两航点处的速度不连续),从而会降低四旋翼的飞行品质甚至引起其失稳。因此,本文还引入高阶多项式函数来平滑 IABC 算法所获得的初始航迹。最后,通过一个仿真算例验证了本文所提方法的有效性。

## 1 航迹规划问题描述

### 1.1 四旋翼的动力学模型

在四旋翼的三维航迹规划中,往往存在转向、加

速、低速巡航等飞行状态,故不能忽视飞行动力学特性。而在飞行力学层面,可将四旋翼视作沿法向驱动力自由运动的单刚体模型,如图 1 所示。

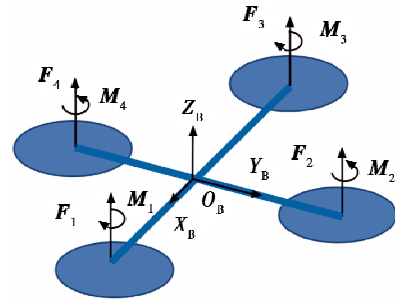


图 1 四旋翼的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a quadrotor

根据牛顿-欧拉法可以推导其力学方程为

$$\begin{cases} m\ddot{\mathbf{r}} = \mathbf{R}_E^B(U_E \mathbf{Z}_B) - mg\mathbf{Z}_E + \mathbf{F}_{Dr} \\ \mathbf{I}\ddot{\mathbf{q}} = (U_2 \ U_3 \ U_4)^T - \mathbf{S}(\dot{\mathbf{q}})\mathbf{I}\dot{\mathbf{q}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $m$ 为四旋翼的质量; $\mathbf{R}_E^B$ 为机体坐标系  $O_B X_B Y_B Z_B$  与地球坐标系  $O_E X_E Y_E Z_E$  之间的传递矩阵; $\mathbf{F}_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ )为旋翼拉力; $\mathbf{M}_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ )为旋翼扭矩; $\mathbf{I} = (I_{xx} \ I_{yy} \ I_{zz})^T$ 为转动惯量; $\mathbf{D}$ 为姿态角到角速度的映射关系; $\mathbf{S}(\cdot)$ 为旋量; $\mathbf{F}_{Dr}$ 为空气阻力; $U_1$ 为总距(油门)输入; $U_2$ 为俯仰输入; $U_3$ 为横滚输入; $U_4$ 为偏航输入; $\mathbf{q} = (\phi \ \theta \ \psi)^T$ 为姿态矩阵, $\phi$ 为俯仰角, $\theta$ 为横滚角, $\psi$ 为偏航角。

当四旋翼低速运动或悬停时,可忽略空气阻力的影响<sup>[11]</sup>。此时的飞行器姿态角不做大幅度变化,故可认为  $\phi \approx 0 \text{ rad}$ ,  $\theta \approx 0 \text{ rad}$ 。此外,也不必频繁操控偏航角,故有  $\dot{\psi} \approx 0 \text{ rad/s}$ 。进而,式(1)可简化为

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{U_1}{m}(\theta \cos \psi + \phi \sin \psi) \\ \ddot{y} = \frac{U_1}{m}(\theta \sin \psi - \phi \cos \psi) \\ \ddot{z} = \frac{U_1}{m} - g \\ \ddot{\phi} = \frac{U_2}{I_{xx}} \\ \ddot{\theta} = \frac{U_3}{I_{yy}} \\ \dot{\psi} = \frac{U_4}{I_{zz}} \end{cases} \quad (2)$$

### 1.2 障碍物建模

对于航迹规划中障碍物的建模,现有的报道大多将其简化成一个圆柱体,这样的处理一定程度上可降低规划算法的计算量。四旋翼在城市间的航迹规划,考虑到建筑物大多为长方体,本文引入长方体作为障碍物模型。对于航点  $\mathbf{P}$ ,若它在长方体内或表面上,则

判断其没有避障,具体的数学实现过程如下:

1) 将长方体分割成 4 个四面体<sup>[12]</sup>,每个四面体的顶点记为  $V_i^1, V_i^2, V_i^3$  和  $V_i^4, i=1, \dots, 4$ ;

2) 计算各顶点与航点  $P$  组成矩阵的行列式值,即

$$\begin{cases} D_1 = \begin{pmatrix} V_1^1 & V_2^2 & V_3^3 & V_4^4 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}^T \\ D_2 = \begin{pmatrix} P & V_2^2 & V_3^3 & V_4^4 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}^T \\ D_3 = \begin{pmatrix} V_1^1 & P & V_3^3 & V_4^4 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}^T \\ D_4 = \begin{pmatrix} V_1^1 & V_2^2 & P & V_4^4 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}^T \\ D_5 = \begin{pmatrix} V_1^1 & V_2^2 & V_3^3 & P \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}^T \end{cases}; \quad (3)$$

3) 若矩阵  $D_1 \sim D_5$  的行列式符号均相同(同为正或同为负),则判断航点  $P$  在长方体障碍物内或表面上,不避障,否则,航点  $P$  避障。

另外,为进一步保证四旋翼的飞行安全,还需设置一个安全飞行距离  $l$ ,故可将长方体障碍物的边界设为

$$(\hat{x}_{ob} \quad \hat{y}_{ob} \quad \hat{z}_{ob})^T = (x_{ob} \pm l \quad y_{ob} \pm l \quad z_{ob} \pm l)^T \quad (4)$$

式中:  $(\hat{x}_{ob}, \hat{y}_{ob}, \hat{z}_{ob})$  为障碍物新的顶点坐标;  $(x_{ob}, y_{ob}, z_{ob})$  为障碍物旧的顶点坐标。

### 1.3 航迹代价的建模

通常,最优的飞行航迹由航迹代价函数决定。在四旋翼飞行过程中主要考虑航程与油耗两个因素。本文利用 Lagrange 方程对航迹代价进行建模<sup>[13]</sup>,即

$$C_{Cost} = C_1 + C_2 = w_1 \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} \sqrt{(\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2)} dt + w_2 \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} U_1^2 (U_1^2)^T dt \quad (5)$$

式中:  $C_{Cost}$  为航迹代价函数;  $C_1$  为航程代价函数;  $C_2$  为油耗代价函数;  $w_1$  与  $w_2$  为权重因子,本文均取为 0.5;  $T_1$  为时间上限。

## 2 航迹规划算法

### 2.1 人工蜂群算法

ABC 算法的详细步骤如下所述。

1) 算法初始化。在解空间内,对于当前待搜索航点位置可通过式(6)随机产生  $x_{ij} (i=1, 2, \dots, N; j=1, 2, \dots, D)$  组解,即随机蜜源组。

$$x_{ij} = x_{ij}^L + rand(0, 1) * (x_{ij}^U - x_{ij}^L) \quad (6)$$

式中:  $N$  为雇佣蜂与跟随蜂数量之和;  $D$  为待搜索航点位置的维数;  $[x_{ij}^L, x_{ij}^U]$  为  $x_{ij}$  的取值范围。

2) 收益度评价。通过式(7)来计算每个蜜源收益度值,也就是每组航迹代价的评价值。进而,保留前

$N/2$  高评价值的航迹。

$$F_i = 1 / (1 + C_{Cost}) \quad (7)$$

3) 雇佣蜂搜索阶段。对已找到的一个蜜源  $x_{ij}^T$ , 进行交叉搜索并产生新蜜源  $v_{ij}$ 。在此阶段,很容易出现过分开采蜜源而导致算法收敛速度变慢。故引入一个自适应策略来提高原算法的收敛速度,即

$$v_{ij} = x_{ij}^{T_2} + \omega \cdot \Phi_{ij} (x_{ij}^{T_2} - x_{ij}^{T_1}) \quad (8)$$

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{T_{\max}} \cdot T_2 \quad (9)$$

式中:  $r \in [1, 2, \dots, N/2] (r \neq i)$ ;  $\Phi_{ij}$  为  $[-1, 1]$  间的随机数;  $\omega \in [\omega_{\min}, \omega_{\max}]$  为权重因子;  $T_2 \in [1, T_{\max}]$  为迭代次数。

4) 贪婪选择阶段。根据贪婪选择方式保留航迹代价较小的解,促使算法朝最优方向进化。

$$x_{ij}^{T_1+1} = \begin{cases} v_{ij} & F(v_{ij}) > F(x_{ij}^{T_2}) \\ x_{ij}^{T_1} & F(v_{ij}) \leq F(x_{ij}^{T_2}) \end{cases} \quad (10)$$

5) 跟随蜂搜索阶段。在此阶段,跟随蜂通过概率值选择雇佣蜂进行跟踪搜索。传统 ABC 算法中跟随蜂的选择概率与收益度值呈正相关关系,多次迭代后,会过滤掉较差的解,但这些解同样也包含着有用信息。为了保持种群多样性,本文采用如下概率选择方式,即

$$g_i = \frac{1/F_i}{\sum_{i=1}^{N/2} (1/F_i)} \quad (11)$$

6) 侦察蜂搜索阶段。当更新次数超过某个阈值时,若当前蜜源不是最优解,且搜索空间中存在最优解,则放弃该蜜源,与之对应的雇佣蜂也转变成侦察蜂重新去寻找蜜源。为了提高侦察蜂对数据的挖掘能力以及避免 ABC 算法陷入局部最优值,本文引入立方混沌映射算子来改进其性能,如式(12)所示。这里需指出,文献[14]通过缜密的数学推理证明了立方混沌映射算子比常见的 Logistic 混沌映射算子具有更好的均匀遍历性与更快的收敛速度。

$$y(n+1) = 4y(n)^3 - 3y(n) \quad (12)$$

式中,  $y(n) \in [0, 1], n=1, 2, \dots, M, M$  为侦察蜂的数量。将生成的混沌序列映射到侦察蜂搜索到的蜜源空间内,实现对新蜜源的混沌搜索,具体过程可参考文献[14],这里不再赘述。

7) 最优值记录。当迭代次数达到最大值时,算法输出最优的航迹点序列以及迭代曲线。

### 2.2 航迹平滑

对于 IABC 算法优化而来的最优或次优飞行航迹,学者们都希望能以最短的时间完成全部的参考航迹跟踪,同时又能利于四旋翼姿态的控制。本文先用高阶多项式函数对 IABC 算法求得航点进行插值处

理,得到一条光滑可飞的新航迹,进而引入速度项和加速度项建立线性规划模型,计算出最优速度序列,使得四旋翼飞行时间最优。

为了获得两航点  $P_0$  与  $P_f$  之间的光滑曲线,采用高阶多项式函数(五阶多项式)进行插补计算,即

$$P(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5 \quad (13)$$

其约束条件为

$$\begin{cases} P_0 = a_0 \\ P_f = a_0 + a_1 t_f + a_2 t_f^2 + a_3 t_f^3 + a_4 t_f^4 + a_5 t_f^5 \\ \dot{P}_0 = a_1 \\ \dot{P}_f = a_1 + 2a_2 t_f + 3a_3 t_f^2 + 4a_4 t_f^3 + 5a_5 t_f^4 \\ \ddot{P}_0 = 2a_2 \\ \ddot{P}_f = 2a_2 + 6a_3 t_f + 12a_4 t_f^2 + 20a_5 t_f^3 \end{cases}$$

上述约束条件可以确定两航点间的速度和加速度,并保证航点间的速度是连续的。

### 3 轨迹跟踪控制器设计

LADRC 控制理论是高志强教授在韩京清教授提出的自抗扰控制基础上改进而来的<sup>[15]</sup>。与自抗扰控制相比,LADRC 的扩张观测器与控制器的均是线性的,并且不使用微分跟踪器,结构更为简单。另外,LADRC 可将控制器参数降到 3 个,即观测器  $\omega_o$ 、控制器带宽  $\omega_c$  及增益  $b_0$ 。观察四旋翼的动力学模型(式(2))可知,位置与姿态的状态变量分别与控制输入呈二阶导数关系,故可以设计 6 个二阶 LADRC 控制器分别镇定四旋翼的位置环与姿态环。

#### 3.1 二阶 LADRC 控制原理

不失一般性的,对于一个二阶被控对象

$$\begin{cases} \ddot{x} = f(x, \dot{x}, w, t) + b(t)u \\ y = x \end{cases} \quad (14)$$

式中: $x$  为系统的状态变量; $u$  为系统的输入; $y$  为系统的输出量; $w$  为系统的扰动量。

定义系统的总扰动  $\bar{f}$  为

$$\bar{f} = f(x, \dot{x}, w, t) + (b(t) - b_0)u \quad (15)$$

式中: $b_0$  为  $b(t)$  的估计值。因此,有

$$\ddot{x} = \bar{f} + b_0 u \quad (16)$$

若  $\bar{f}$  可微分,引入一个新的状态变量  $x_3$  作为扩张状态变量,并使得  $x_3 = \bar{f}$ ,则式(14)可改成状态空间方程的形式

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u + \mathbf{E}\dot{\bar{f}} \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \end{cases} \quad (17)$$

式中: $\mathbf{x} = (x_1 \ x_2 \ x_3)^T$  为状态向量, $x_1 = x, x_2 = \dot{x}, x_3 = \bar{f}$  为扩张状态变量;矩阵  $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$  和  $\mathbf{E}$  的表达形式分

$$\text{别为 } \mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 \\ b_0 \\ 0 \end{pmatrix}, \mathbf{C} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}^T, \mathbf{E} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

采用线性扩张观测器对式(17)进行观测,则有

$$\begin{cases} \dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}u + \mathbf{L}(y - \hat{\mathbf{y}}) \\ \hat{\mathbf{y}} = \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}} \end{cases} \quad (18)$$

式中: $\hat{\mathbf{x}} = (\hat{x}_1 \ \hat{x}_2 \ \hat{x}_3)^T$  为状态观测向量; $\hat{\mathbf{y}}$  为系统估计输出。观测器增益向量  $\mathbf{L}$  中的每个元素可由二项式定理求出<sup>[15]</sup>,即  $\mathbf{L} = (3\omega_o \ 3\omega_o^2 \ \omega_o^3)^T$ 。当总扰动  $\bar{f}$  有界时,可通过选择合适的观测器带宽  $\omega_o$  来保证 LESO 为有界输入输出(Bounded Input Bounded Output, BIBO)稳定,从而精确获得总扰动的估计值  $\hat{\bar{f}}$ 。

选择控制律为  $u = (-\hat{\bar{f}} + u_0)/b_0$ ,则二阶系统的控制可转化为简单的积分控制形式  $\ddot{x} \approx u_0$ ,即

$$u_0 = k_1(r_e - \hat{x}_1) + k_2(\dot{r}_e - \hat{x}_2) + \ddot{r}_e \quad (19)$$

式中: $r_e$  为参考值; $\mathbf{K} = (k_1 \ k_2)^T$  为比例系数矩阵,它的每个元素也可由二项式定理求出,即  $\mathbf{K} = (\omega_c^2 \ 2\omega_c)^T$ 。通过选择合适的控制器带宽  $\omega_c$  可保证该控制通道 BIBO 稳定。

#### 3.2 四旋翼轨迹跟踪控制框图

根据时间尺度原理,可将四旋翼的动力学模型分为位置与姿态两个控制环,并分别设计二阶 LADRC 控制器,如图 2 所示。其中, $(X_r, Y_r, Z_r)$  为参考轨迹, $(\phi_r, \theta_r, \psi_r)$  为控制过程中产生的中间姿态参考值。

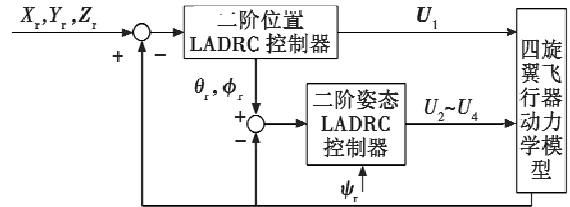


图 2 四旋翼位姿控制框图

Fig. 2 Position and attitude control for a quadrotor

### 4 仿真分析

本章通过一个仿真算例来验证所提基于 IABC 算法的四旋翼三维航迹规划以及基于 LADRC 的轨迹跟踪控制的有效性。设置仿真环境为:飞行空间为  $12 \text{ m} \times 8 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ ,环境中存在 4 个长方体障碍物;飞行的起始位置为  $(1 \text{ m}, -4 \text{ m}, 1 \text{ m})$ ,目标位置为  $(8 \text{ m}, 7 \text{ m}, 5 \text{ m})$ ,安全飞行距离  $l = 0.1 \text{ m}$ ;飞行要求为从起始点位置到目标位置的航程短且避障、飞行耗时少;四旋翼的质量  $m = 0.2 \text{ kg}$ ,臂长为  $0.1 \text{ m}$ ,转动惯量为  $I_{xx} = I_{yy} = 2 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2, I_{zz} = 3.7 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ;偏航角设为  $\psi_r = 0 \text{ rad}$ 。

整个仿真过程分为两步:1)用寻优算法找出一条航迹代价值最小的航迹,并对其平滑处理;2)将



处理后的平滑航迹作为飞行控制器的参考轨迹,通过LADRC控制器实现对参考轨迹的跟踪。设置IABC算法的仿真条件为: $N=30, l_{\text{limit}}=5$ 。同时,分别引入ABC算法和GA算法来比较IABC算法的性能。ABC算法的条件与IABC算法相同,GA算法的仿真条件为:抗体种群数为30,交叉因子与变异因子分别为0.8与0.2。考虑到航迹规划的时效性,设置3种算法的迭代总次数为20。另外,每种算法均重复10次,记录下每次的规划效果,并取其中最优结果作为参考。

航迹规划的效果如图3和图4所示。从图中可以看出,3种算法均能为四旋翼规划出一条安全避障的飞行轨迹,但这些轨迹不可飞;高阶多项式函数对规划的轨迹进行了插值处理,使得轨迹平滑可飞。相比而言,IABC算法规划的效果最好。这表明IABC算法对数据的开采能力更强。图5给出了3种算法迭代曲线,可以看出,IABC算法的收敛速度明显高于ABC算法与GA算法,且能够挖掘到更好的解。这表明改进后的ABC算法无论在收敛速度上还是数据挖掘上都有很大的性能提升。

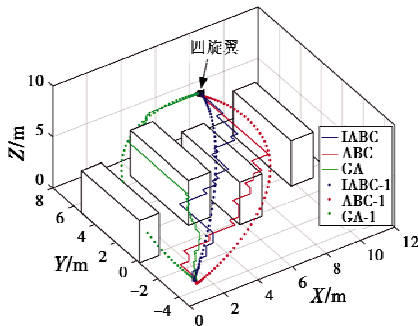


图3 3D航迹规划结果

Fig. 3 3D path planning result

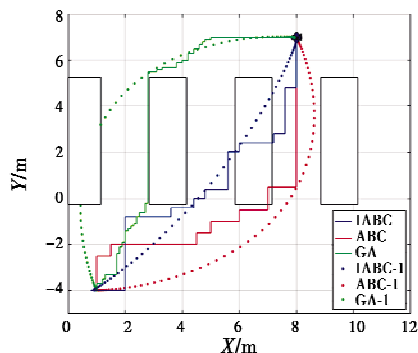


图4 XY平面内的规划效果

Fig. 4 Result of path planning in XY plane

进一步地,表1给出了3种算法的寻优性能指标对比。从表中可以看出,IABC算法规划的航迹长度是最短的,分别比ABC算法、GA算法缩短了0.9%和3.18%。由于IABC算法中引入了自适应策略、新的概率选择方式及立方混沌搜索算子,其优化效率不及

ABC算法,且优化成功率也低于后者。但总体来讲,80%的成功率还是说明IABC算法具有较高的可靠性。

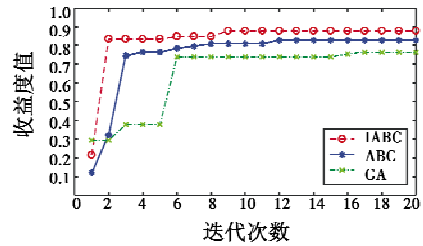


图5 3种算法的迭代曲线

Fig. 5 Iteration curves of the three algorithms

表1 3种算法的性能指标对比

Table 1 Comparison of performance index for three algorithms

算法	航迹长度/m	优化时间/s	成功率/%
IABC	22	40.1	80
ABC	22.2	38.6	90
GA	22.7	56.9	60

表2给出了3种航迹平滑后的性能指标对比。从表2中可以看出,经平滑后IABC-1获得的航迹长度还是最短的,飞行时间也最少,并且能够有效避障。

表2 3种航迹平滑后的性能指标对比

Table 2 Comparison of performance index for three algorithms after smoothing

算法	飞行轨迹/m	飞行时间/s	是否避障
IABC-1	14.34	13.7	是
ABC-1	16.21	15.0	是
GA-1	16.51	16.4	否

将平滑处理的航迹IABC-1作为四旋翼的参考轨迹,并在测量端添加幅值为0.05的随机扰动。在二阶LADRC控制器的作用下,四旋翼的三维轨迹跟踪效果如图6和图7所示。从图中可以看出,位置控制器基本上可以跟踪参考轨迹。由于扰动的存在,前期的跟踪超调比较大,但是LADRC还是可以迅速地抑制扰动,减小跟踪误差。

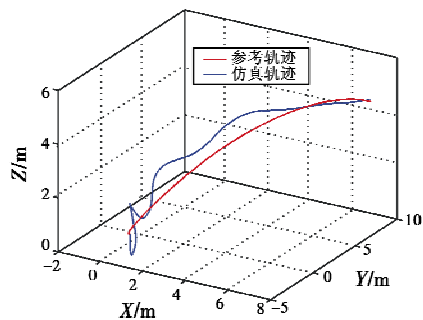


图6 三维轨迹跟踪结果

Fig. 6 Result of 3D trajectory tracking

图8和图9给出了俯仰角和横滚角的响应曲线,

姿态角的参考值由位置环给出。从图中可以看出,俯仰角和横滚角均在 1 s 左右跟踪上参考值,可以满足四旋翼实际操控的需求。另外,两个姿态角的稳态误差均能够保持在  $\pm 0.02$  rad 内。这表明 LADRC 控制器鲁棒性强、响应速度快及控制精度高。

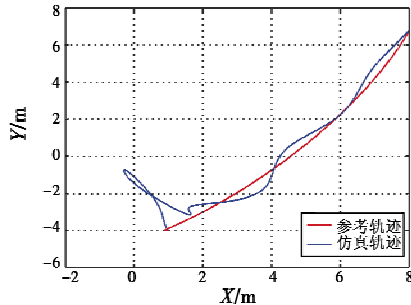


图 7 XY 平面内跟踪轨迹

Fig. 7 Tracking trajectory in XY plane

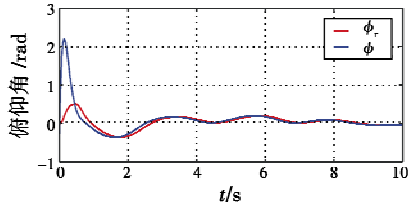


图 8 俯仰角的响应

Fig. 8 Response of pitch angle

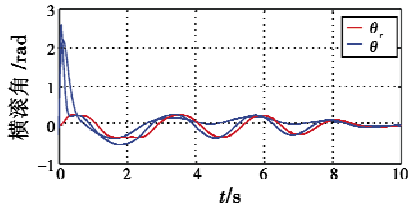


图 9 横滚角的响应

Fig. 9 Response of roll angle

## 5 结论

提出了一种改进的人工蜂群算法来实现四旋翼的航迹规划。算法中,在雇佣蜂搜索阶段引入自适应策略、跟随蜂搜索阶段引入一个新的概率选择方式、侦察蜂搜索阶段引入立方映射混沌算子来提高收敛速度,避免陷入局部最优值。

根据四旋翼动力学特性,设计位置环与姿态环二阶 LADRC 控制器。以高阶多项式函数平滑后的航迹为参考轨迹,实现高精度的抗干扰轨迹跟踪控制。

仿真结果表明, IABC 算法的迭代速率、规划结果均优于 ABC 算法与 GA 算法,改进后的 ABC 算法具有更强的数据挖掘能力与鲁棒性;所设计的二阶 LADRC 控制器能够有效抑制扰动,使四旋翼快速跟踪上参考轨迹。

## 参考文献

- [1] 庞庆霏,李家文,黄文浩. 四旋翼飞行器设计与平稳控制仿真研究[J]. 电光与控制, 2012, 19(3): 51-55.
- [2] 赵启兵,刘勇. 多旋翼飞行器的可控制度分析[J]. 航空学报, 2017, 38(s1): 721561.
- [3] WANG C C, CHU H C E, MIRJALILI S. Three-dimensional path planning for UCAV using an improved bat algorithm [J]. Aerospace Science and Technology, 2016(49): 231-238.
- [4] YANG L, ZHANG X J, GUAN X M, et al. Adaptive sensitivity decision based path planning algorithm for unmanned aerial vehicle with improved particle swarm optimization [J]. Aerospace Science and Technology, 2016(58): 92-102.
- [5] SHORAKAEI H, VAHDANI M, IMANI B, et al. Optimal cooperative path planning of unmanned aerial vehicles by a parallel genetic algorithm [J]. Robotica, 2016, 34(4): 823-836.
- [6] 马瑞,吴洪涛,丁力. 基于人工蜂群算法的无人直升机 LQC/LTR 控制律优化设计[J]. 控制与决策, 2016, 31(12): 2248-2254.
- [7] SALIH A L, MOGHAVVEMI M, MOHAMED H A F, et al. Modelling and PID controller design for a quadrotor unmanned air vehicle [C]//IEEE International Conference on Automation Quality and Testing Robotics (AQTR), IEEE, 2010: 1-5.
- [8] CHEN B M. Robust and control [M]. New York: Springer, 2000.
- [9] CABECINHAS D, CUNHA R, SILVESTRE C. A nonlinear quadrotor trajectory tracking controller with disturbance rejection [J]. Control Engineering Practice, 2014, 26(1): 1-10.
- [10] DONG W, GU G Y, ZHU X, et al. High-performance trajectory tracking control of a quadrotor with disturbance observer [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2014, 211(5): 67-77.
- [11] NIKITIN D. Adaptive quaternion-based quadrotor control system [J]. Upravlenie Bol'shimi Sistemami, 2017, 69(3): 76-101.
- [12] 体会大自然. Matlab 判断一个点是否在多面体内 [EB/OL]. (2013-01-13) [2018-11-01]. [http://blog.sina.com.cn/s/blog\\_6cc7141501016iah.html](http://blog.sina.com.cn/s/blog_6cc7141501016iah.html).
- [13] COWLING I. Towards autonomy of a quadrotor UAV [D]. Bedfordshire: Cranfield University, 2008.
- [14] CHEN G, WU X, ZHU X, et al. Efficient string matching with wildcards and length constraints [J]. Knowledge and Information Systems, 2006, 10(4): 399-419.
- [15] DING L, MA R, WU H T, et al. Yaw control of an unmanned aerial vehicle helicopter using linear active disturbance rejection control [J]. Journal of System and Control Engineering, 2017. doi: 10.1177/0959651817708488.