

基于图论法的四旋翼三角形结构编队控制

赖云晖¹, 李 瑞^{1†}, 史莹晶¹, 贺 亮^{2,3}

(1. 电子科技大学 自动化工程学院, 四川 成都 611731; 2. 上海航空控制技术研究所, 上海 201109;
3. 上海市空间智能控制技术重点实验室, 上海 201109)

摘要: 针对四旋翼无人机编队控制, 提出了一种基于图论法的四旋翼三角形结构编队. 本文将四旋翼无人机编队整体视为一幅有向图, 四旋翼为有向图中的点, 四旋翼间的距离及通讯状态为有向图的边; 结合Leader-Follower理论, 通过相应的距离反馈控制律对领航者和跟随者设计不同的控制策略; 进而使三架四旋翼无人机彼此间相对的距离收敛到一个稳定的值, 最终形成一个固定的三角形结构编队. 仿真研究和结果验证了本文提出编队控制策略的有效性和优越性.

关键词: 无人机; 编队; 图论法; 领航者-跟随者

引用格式: 赖云晖, 李瑞, 史莹晶, 等. 基于图论法的四旋翼三角形结构编队控制. 控制理论与应用, 2018, 35(10): 1530 – 1537

中图分类号: TP273 文献标识码: A

On the study of a multi-quadrotor formation control with triangular structure based on Graph theory

LAI Yun-hui¹, LI Rui^{1†}, SHI Ying-jing¹, HE Liang^{2,3}

(1. School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Sichuan Chengdu 611731, China;
2. Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 201109, China;
3. Shanghai Key Laboratory of Aerospace Intelligent Control Technology, Shanghai 201109, China)

Abstract: In this paper, a multi-quadrotor formation control scheme based on Graph theory is proposed for controlling three quadrotors forming a triangular structure. The whole quadrotor formation structure is viewed as a weighted graph, each quadrotor is mapped to the point of the graph, and the distance and communication between quadrotors are mapped to the line of the graph. By combining with Leader-Follower method, we design different formation control scheme for the leader quadrotor as well as the follower quadrotor through distance feedback control, resulting that three quadrotors can utilize the relative distance mutually and converge to a stable value. The quadrotor formation structure will form a fixed triangular structure in the end. Simulation studies demonstrate the effectiveness and superiority of the proposed multi-quadrotor formation control scheme.

Key words: unmanned aerial vehicle; formation; graph theory; leader-follower

Citation: LAI Yunhui, LI Rui, SHI Yingjing, et al. On the study of a multi-quadrotor formation control with triangular structure based on Graph theory. *Control Theory & Applications*, 2018, 35(10): 1530 – 1537

1 引言(Introduction)

近年来, 科学家通过自然现象以及实验研究发现, 多智能体编队系统相较于单个智能体而言在执行任务的效率和复杂性上具有明显的优势^[1]. 由于其在诸多领域中的应用价值, 多智能体编队问题成为了数学、生态学、控制学等多个学科关注的一个前沿问题. 无人机作为智能飞行器, 具有机动灵活、操作简单、使用成本低等优点, 因此广泛应用于军用及民用领域.

而四旋翼无人机又因其可垂直起飞、定点悬停等优势, 备受研究者关注. 目前针对无人机编队控制, 国内外学者已经做了大量的研究^[2-4].

无人机编队是通过无人机间的相互联系, 将多架无人机按照一定的队形组成一个大规模的机群. 与载人飞机编队不同, 无人机编队更加强调飞机之间的相互联系和协调. 在正常情况下, 无人机编队会保持既定的任务队形; 当飞行态势评估结果和任务要求等发

收稿日期: 2018-01-21; 录用日期: 2018-10-20.

[†]通信作者. E-mail: lirui@uestc.edu.cn.

本文责任编辑: 段广仁.

国家自然科学基金项目(61450010)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (61450010).

生变化时编队队形会重构并稳定到新的适应队形. 编队的动态重构提高了无人机编队作为一个整体执行任务的效率, 并且能够完成更复杂、多样的任务^[5].

四旋翼无人机编队控制策略分为两种: 集中式编队控制策略和分布式编队控制策略. 集中式编队控制策略要求编队中每一架四旋翼或者至少有一架四旋翼能够获得编队中其他所有四旋翼的状态信息, 以通过运算规划每一架四旋翼的运动轨迹来达到编队要求^[6]. 集中式编队控制策略是目前比较成熟且易于实现的方法, 但在大规模的机群编队中会产生庞大的信息交换, 降低了系统的灵活性和容错性. 为了解决机群规模限制这一问题, 科学家们又引入了分布式控制思想. 分布式编队控制策略中, 每架四旋翼均不需要获得编队中其他所有四旋翼的状态信息, 只需要得到相邻几个四旋翼的状态信息即可实现编队控制^[7]. 这一方法大大降低了编队系统中信息的交换量, 提高了系统的灵活性^[8]. 当前主流的分布式编队控制策略主要有基于行为法的编队控制^[9]、基于虚拟结构法的编队控制^[10]、基于人工势场法的编队控制^[11]、基于图论法的编队控制^[12]和基于Leader-Follower法的编队控制^[13]等.

文献[14-15]研究了基于行为法的飞行器编队控制问题, 分别用双环控制和李雅普诺夫直接法设计无人机的队形保持器, 并在仿真环境下验证队形误差的收敛情况. 文献[16]采用人工势场法设计了无人机在引力和斥力场下的势能函数, 通过安全和危险两种模式实现了对无人机编队的实时控制. 文献[17]采用一致性理论, 将通信拓扑和通信权重的概念引入人工势场法, 利用改进后的人工势场法建立了无人机编队的防碰撞控制策略, 使机群在三维飞行仿真中可以有效规避障碍物. 文献[12]首先提出一种基于图论法的分布式编队控制方法, 考虑通过相应的距离反馈控制律使3个agent可以根据彼此的相对距离以指数的形式收敛到一个稳定的三角形编队. 文献[18]将滑模控制用于四旋翼无人机Leader-Follower编队控制, 并基于PD方法设计控制律, 得出Follower能够很好地跟踪Leader的仿真结果. 文献[19]设计出基于自适应编队的控制律, 将Leader-Follower应用到了三维空间中, 建立四旋翼无人机仿真模型. 文献[20]在分布式控制的思想下, 将卡尔曼滤波器与四旋翼编队相结合, 利用滤波器估计的无人机间的相对距离及速度通过LQR控制输入到飞机的控制端, 分布式地控制三架四旋翼形成稳定编队.

上述文献大多是针对仿真环境下四旋翼模型或质点模型展开, 并没有将所提出的方法应用到实际的四旋翼飞行器上. 而多架四旋翼编队飞行平台有着广泛的应用背景和需求, 例如农业联合灌溉, 危险地区大范围联合搜索和大环境联合监控等. 因而, 针对四旋

翼飞行器实物平台实现编队任务既满足实际应用需求, 也是今后一个重要的研究方向.

本文依据四旋翼飞行器运动学模型和文献[21]提出的基于自适应算法的移动机器人编队控制, 提出了一种改进后的基于图论法的四旋翼三角形结构编队控制方法. 通过引入偏航角一致性算法, 将编队控制中的领航者系统的队形控制简化为对系统中各领航者在自身坐标系下的速度控制. 最终在MATLAB环境下对控制器进行了仿真, 并在半实物仿真环境GAZEBO下将该方法应用到具体的四旋翼模型上, 证明了使用改进后方法的有效性, 便于未来将该方法应用于实际飞行器的编队任务中.

2 四旋翼模型(Model of the multi-quadrotor)

四旋翼无人机是一种拥有4个输入, 6个自由度输出的欠驱动系统. 4个输入分别控制4个电机转动, 6个自由度输出包括四旋翼的姿态角度(横滚角、俯仰角、偏航角)和3个轴向运动(三维方向).

如图1所示, 本文所使用的四旋翼机体结构呈“X”型, 机头方向为前向的两个机臂正中. 以四旋翼机身中心为原点 O , 将机头方向定为 X_b 轴, 机身垂直向下定为 Z_b 轴, 基于右手定则将四旋翼右向定为 Y_b 轴. 建立四旋翼的机体坐标系 O_b ; 导航坐标系选取四旋翼起飞地面坐标为原点 O_e , 将正北方向作为 X_e 轴, 地面垂直向下为 Z_e 轴, 基于右手定则将东向作为 Y_e 轴建立, 通过上述两个坐标系可以实现四旋翼的空间定位.

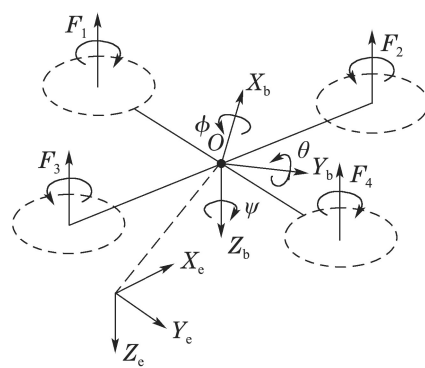


图 1 “X”型四旋翼模型

Fig. 1 The configuration of a “X” frame quadrotor

四旋翼在导航坐标系下的位置向量为 (x, y, z) , 在机体坐标系下定义的姿态角向量 (ϕ, θ, ψ) 由横滚角、俯仰角和偏航角组成, 两个坐标系在转换时有着严格的旋转顺序如图2所示.

从导航坐标系到机体坐标系的旋转矩阵为

$${}^B_R = \text{Rot}(\phi)\text{Rot}(\theta)\text{Rot}(\psi). \quad (1)$$

反之, 从机体坐标系到导航坐标系为

$${}^E_R = {}^B_R^T = \text{Rot}^T(\psi)\text{Rot}^T(\theta)\text{Rot}^T(\phi). \quad (2)$$

其中 $\text{Rot}(\phi)$, $\text{Rot}(\theta)$, $\text{Rot}(\psi)$ 分别为

$$\text{Rot}(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\text{Rot}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\text{Rot}(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}. \quad (5)$$

在一般的编队系统中, 为了保证编队飞行中每架四旋翼飞行状态的一致性, 系统要求必须在统一的坐标系内(一般为导航坐标系)对每一架四旋翼进行控制, 以此保证每架四旋翼在飞行任务的约束下有相同的飞行趋势. 但是就四旋翼控速飞行而言, 一般只能控制其在自身机体坐标系下前向和右向两个方向上分速度的矢量和使其按任意方向飞行. 所以在导航坐标系下计算出四旋翼为了维持编队队形所需要的速度矢量后, 还需转换到机体坐标系下作用到相应的速度分量上, 即

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = {}^B_E R \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

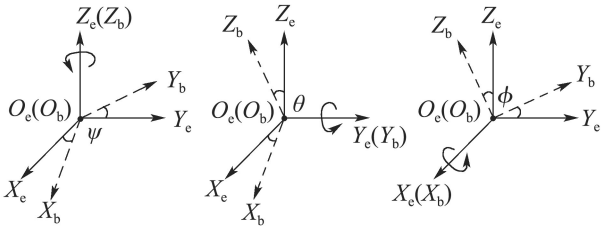


图2 坐标系旋转模型

Fig. 2 Coordinate rotation model

3 编队模型(Model of the formation)

本文根据文献[21]提出的基于自适应的移动机器人编队控制算法结合四旋翼无人机编队的实际模型, 提出了一种改进后的基于图论法的四旋翼三角形结构编队控制方法. 并依据Leader-Follower理论, 对领航者和跟随者设计了不同的控制律.

Leader-Follower理论最初由Kumar教授和其团队提出^[11], 分为 $l-\phi$ (距离-角度)和 $l-l$ (距离-距离)两种. 基本思想是指定四旋翼无人机编队中的某个无人机作为领航者(Leader), 领导整个编队运动; 其他无人机作为跟随者(Follower)跟随领航者运动. 通过保持Leader与Follower之间的相对距离和角度就能形成期望的队形.

根据图论相关的知识, 本文将编队系统中的每架四旋翼抽象为刚体作为图中的点, 其动力学模型为

$$\dot{x}_i = v_i, \quad i = 1, 2, 3, \quad (7)$$

其中: $x_i \in \mathbb{R}^2$ 为第 i 架四旋翼在导航坐标系下的二维位置向量, $v_i \in \mathbb{R}^2$ 为它当前的二维速度向量; 四旋翼之间的距离和通信状态为图中的边, 如图3所示.

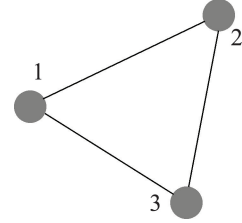


图3 四旋翼编队拓扑模型

Fig. 3 Quadrotor formation model based on topology

编队中的每一架四旋翼均搭载相关的定位传感器, 用以测量其自身与相邻四旋翼间的距离. 结合Leader-Follower思想, 本文设计在此编队中有两架领航者和一架跟随者, 1号和2号为领航者, 3号为跟随者. 为了保持一个恒定的编队运行速度 v_0 和稳定的三角形编队结构, 两架领航者之间可以获得彼此的位置和速度信息, 而跟随者只能单方面获取两架领航者的位置以调节自身的飞行姿态达到编队要求. 综上所述, 编队任务需求为:

- 1) 两架领航者以速度 v_0 飞行的同时保持一个期望的距离 d_{12} ;
- 2) 跟随者相对于两架领航者分别保持期望距离 d_{31} 和 d_{32} 以达到一个稳定的三角形编队.

更具体一些, 当 $t \rightarrow \infty$ 时,

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &\rightarrow v_0, \\ \dot{x}_2(t) &\rightarrow v_0, \\ \|x_1(t) - x_2(t)\| &\rightarrow d_{12}, \\ \|x_3(t) - x_1(t)\| &\rightarrow d_{31}, \\ \|x_3(t) - x_2(t)\| &\rightarrow d_{32}. \end{aligned}$$

且当

$$\begin{aligned} \|x_1(t) - x_2(t)\| &= d_{12}, \\ \|x_3(t) - x_1(t)\| &= d_{31}, \\ \|x_3(t) - x_2(t)\| &= d_{32} \end{aligned}$$

时, 还必须满足约束条件

$$\begin{aligned} d_{12} &< d_{31} + d_{32}, \\ d_{31} &< d_{12} + d_{32}, \\ d_{32} &< d_{31} + d_{12}. \end{aligned}$$

从而, 保证所形成的编队队形是一个三角形结构.

4 控制器设计(Controller design)

本文引言中提到的基于行为法, 虚拟结构法和 Leader-Follower 法的编队控制方法各有优缺点. 行为法的优点在于它是一个分布式的控制方法, 单个四旋翼一般只需要接收其相邻四旋翼的信息, 不会受机群规模的影响. 但该方法的缺点在于它无法显式的定义机群的整体行为. 区别于行为法, 虚拟结构法可以很好的从整体描述编队行为, 并易于用反馈控制律保持队形, 但同时也要求队形刚性变化, 应用范围受限. Leader-Follower 法的优势在于整体编队行为可以由领航者决定, 但缺点是跟随者的运动无法影响领航者.

而在四旋翼编队控制中, 无人机间借助通信手段形成了彼此影响的网络结构, 将编队系统建模为图后, 可以利用图论的相关知识很好地解决编队问题. 图论法可以用来设计四旋翼编队的队形, 有向图无向图均可以, 同时还可以通过改变图的结构改变编队队形. 基于此, 本文采用图论法结合 Leader-Follower 理论设计了编队队形控制器, 完整的描述了编队的过程并得到了预期的结果.

4.1 基于自适应算法的移动机器人编队控制 (Adaptive control schemes for mobile robot formations)

文献[21]针对第3节中三角形结构编队要求, 对刚体质点模型下的领航者和跟随者设计了不同的距离反馈控制律, 如式(8)所示. 其中 $x_i (i = 1, 2, 3)$ 为移动机器人 i 的二维位置向量, v_0 为期望的编队整体运行速度, $\|\cdot\|$ 表示两个机器人间的相对距离, $d_{ij} (i, j = 1, 2, 3)$ 表示机器人 i 和 j 之间的期望编队距离.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = v_0 + (x_2 - x_1)(\|x_2 - x_1\|^2 - d_{12}^2), \\ \dot{x}_2 = v_0 + (x_1 - x_2)(\|x_1 - x_2\|^2 - d_{12}^2), \\ \dot{x}_3 = \omega_3 + (x_1 - x_3)(\|x_1 - x_3\|^2 - d_{13}^2) + \\ \quad (x_2 - x_3)(\|x_2 - x_3\|^2 - d_{23}^2), \\ \dot{\omega}_3 = (x_1 - x_3)(\|x_1 - x_3\|^2 - d_{13}^2) + \\ \quad (x_2 - x_3)(\|x_2 - x_3\|^2 - d_{23}^2). \end{cases} \quad (8)$$

同时, 文献[21]对 $t \rightarrow \infty$ 时 ω_3 会收敛到 v_0 做了详细的证明. 在这样的控制律作用下, 3个移动机器人会最终以距离 $d_{ij} (i, j = 1, 2, 3)$ 形成一个稳定的三角形编队结构, 并以速度 v_0 运动.

但将此控制方法应用在实际四旋翼模型编队中发现, 由于两架领航者是分别朝彼此的方向运动, 所以误差的累积会造成其中一架领航者以另一架为圆心作半径为 d_{12} 的旋转, 使四旋翼编队整体自旋, 无法达到稳定的三角形结构.

为了解决上述问题, 本文针对四旋翼模型提出了

一种改进后的距离反馈控制律.

4.2 基于图论法的四旋翼三角形结构编队控制 (A multi-quadrotor formation control with triangular structure based on Graph theory)

从第4.1节分析可知, 三角形编队不稳定的根本原因是两架领航者之间的相对位置不固定造成的, 为了使两架领航者之间保持一定的距离和方位, 本文对两架领航者再引入基于 $l - \phi$ 的 Leader-Follower (l 为相对距离, ϕ 为相对方位) 来保证两架领航者间保持一定的相对位置.

如图4所示, 本文希望能够按照 Leader-Follower 控制思想, 使领航者2相对于领航者1在导航坐标系下保持相对距离 l_d 和相对方位 ϕ_d 来固定队形. 为此, 本文通过式(9)和式(10)将控制量 l_d 和 ϕ_d 转换到领航者2机体坐标系下的 f_d 和 s_d . 通过控制(11)中的偏差 $[e_f \ e_s]^T$ 收敛到0, 就可以保证领航者2相对于领航者1在其机体坐标系的前向和右向上保持一定的距离 f_d 和 s_d , 以维持两架领航者的相对位置 l_d 和相对方位 ϕ_d . 其中, ψ_1 为领航者1在导航坐标系下的偏航角, (x_1, y_1) 为领航者1在导航坐标系下的二维位置向量, (x, y) 为领航者2在导航坐标系下的二维位置向量, V_1 为领航者1在导航坐标系下的合速度, f_d 和 s_d 为期望在领航者2机体坐标系下保持的距离.

$$l_d = \sqrt{f_d^2 + s_d^2}, \quad (9)$$

$$\phi_d = \arctan \frac{s_d}{f_d}, \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} e_f \\ e_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \psi_1 & -\cos \psi_1 \\ \cos \psi_1 & \sin \psi_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 - x \\ y_1 - y \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} f_d \\ s_d \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$\sin \psi_1 = \frac{V_{1y}}{\sqrt{V_{1x}^2 + V_{1y}^2}}. \quad (12)$$

为了简化控制流程, 本文首先引入偏航角控制律

$$\dot{\psi} = \frac{V_1}{f_d} \sin(\psi_1 - \psi), \quad (13)$$

ψ 为领航者2在导航坐标系下的偏航角, 通过控制偏航角速度来保证领航者2的机头朝向始终与领航者1一致. 在此前提下, 引入改进后的距离反馈控制律

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = v_0, \\ \dot{x}_2 = {}^E_B R \omega_2, \\ \omega_2 = \begin{bmatrix} v_{0f} \\ v_{0s} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{1f} - x_{2f} \\ x_{1s} - x_{2s} \end{bmatrix} \left(\frac{(x_{1f} - x_{2f})^2}{(x_{1s} - x_{2s})^2} - \frac{f_d^2}{s_d^2} \right), \end{cases} \quad (14)$$

其中:

$$\begin{bmatrix} v_{0f} \\ v_{0s} \end{bmatrix} = {}^E_B R v_0,$$

$$\begin{bmatrix} x_{1f} - x_{2f} \\ x_{1s} - x_{2s} \end{bmatrix} = {}^B_E R(x_1 - x_2).$$

这里的 $x_i (i = 1, 2)$ 为导航坐标系下的领航者 i 的二维位置向量, ω_2 为领航者2机体坐标系下的二维速度向量, ${}^B_E R$ 与 ${}^B_E R$ 为相关旋转矩阵. 通过此控制律, 领航者1与领航者2按照速度 v_0 带领四旋翼编队飞行, 同时领航者2又可以与领航者1保持一定的距离和方位角以此达到一个稳定的领航者结构, 使跟随者能够根据此结构形成一个稳定的三角形编队.

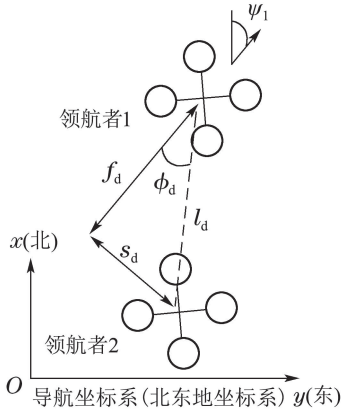


图4 领航者系统Leader-Follower模型

Fig. 4 Leader-Follower model of leader system

综上所述, 将改进后的算法应用于四旋翼无人机三角形结构编队可以通过以下步骤实现:

步骤1 通过领航者1确定整个编队的飞行速度 v_0 ;

步骤2 领航者2利用一致性算法保持偏航角与领航者1一致为 ψ_1 ;

步骤3 偏航角一致后, 领航者2利用改进后的控制律在其机体坐标系下与领航者1保持距离(f_d , s_d), 固定二者相对位置, 并收敛到编队速度 v_0 ;

步骤4 跟随者3通过获取领航者1和2的位置, 利用改进后的控制律形成如图5的三角形编队结构并收敛到编队速度 v_0 .

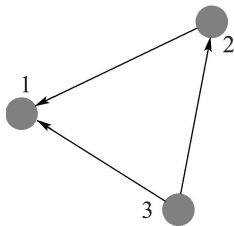


图5 改进后四旋翼编队图论模型

Fig. 5 Improved quadrotor formation model based on Graph theory

改进后算法的完整控制律为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = v_0, \\ \dot{x}_2 = {}^B_E R \omega_2, \\ \omega_2 = \begin{bmatrix} v_{0f} \\ v_{0s} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{1f} - x_{2f} \\ x_{1s} - x_{2s} \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} (x_{1f} - x_{2f})^2 \\ (x_{1s} - x_{2s})^2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} f_d^2 \\ s_d^2 \end{bmatrix} \right), \\ \dot{x}_3 = \omega_3 + (x_1 - x_3)(\|x_1 - x_3\|^2 - d_{13}^2) + \\ (x_2 - x_3)(\|x_2 - x_3\|^2 - d_{23}^2), \\ \dot{\omega}_3 = (x_1 - x_3)(\|x_1 - x_3\|^2 - d_{13}^2) + \\ (x_2 - x_3)(\|x_2 - x_3\|^2 - d_{23}^2), \end{cases} \quad (15)$$

其中:

$$\begin{bmatrix} v_{0f} \\ v_{0s} \end{bmatrix} = {}^B_E R v_0, \quad \begin{bmatrix} x_{1f} - x_{2f} \\ x_{1s} - x_{2s} \end{bmatrix} = {}^B_E R(x_1 - x_2),$$

偏航角控制率如式(13)所示, 其中:

$$l_d = \sqrt{f_d^2 + s_d^2}, \quad \phi_d = \arctan \frac{s_d}{f_d},$$

$$\sin \psi_1 = \frac{V_{ly}}{\sqrt{V_{lx}^2 + V_{ly}^2}}.$$

5 仿真研究(Simulation)

本文分别在MATLAB环境和GAZEBO半实物仿真环境中对改进后的四旋翼三角形结构编队算法进行编程仿真, 以测试算法的有效性. 在MATLAB环境下, 本文将四旋翼视为理想刚体采用质点模型代替; 在GAZEBO环境下, 本文采用实际的四旋翼模型进行完整编队仿真.

5.1 MATLAB环境仿真(Simulation in MATLAB)

首先, 本文对所引入偏航角控制在MATLAB下进行仿真. 假设领航者1在参考坐标系下的初始偏航角为0, 飞行轨迹为

$$x_1(t) = \begin{bmatrix} 2\cos(0.25t) \\ \sin(0.5t) \end{bmatrix}. \quad (16)$$

则领航者1的飞行速度为

$$\dot{x}_1(t) = \begin{bmatrix} -0.5\sin(0.25t) \\ 0.5\cos(0.5t) \end{bmatrix}, \quad (17)$$

$$V_1 = \sqrt{(-0.5\sin(0.25t))^2 + (0.5\cos(0.5t))^2}. \quad (18)$$

记领航者1的偏航角为 ψ_1 . 同时, 令领航者2与领航者1的相对位置为

$$(f_d, s_d) = (0.5, 0.5), \quad (19)$$

并分别以初始偏航角为 $\pi/2$, $3\pi/4$, $-\pi/3$ 和 $-\pi$ 进行仿真, 结果如图6所示. 为清晰, 将上述4种情况下领航者2的偏航角分别记为 $\psi_2^1, \psi_2^2, \psi_2^3, \psi_2^4$. 4种情况下领航者2的偏航角均可以快速收敛并与领航者1保持一致, 使两架领航者的机头朝向相同, 方便后续编队控制.

在两架领航者的机头飞行方向一致的基础上, 本文分别对文献[21]所提出的编队控制方法和改进后的

基于图论的编队控制方法进行领航者系统仿真. 假设领航者1的初始位置为(0, 0), 初始偏航角为 $\pi/4$, 以 $v_0 = (\sqrt{2}/2, \sqrt{2}/2)$ 做匀速直线飞行, 期间不改变速度. 领航者2的初始位置分别为 $(3\sqrt{2}/4, -9\sqrt{2}/4)$ 和 $(-2\sqrt{2}, -\sqrt{2}/2)$. 本部分仿真计划实现两种情况下领航者2在其机体坐标系下与领航者1的相对距离均为 $(f_d, s_d) = (2, 2)$, 即相对方位 $\phi_d = \pi/4$, 同时领航者2的飞行速度最后与领航者1保持一致. 仿真参数如表1所示. 为清晰, 后续仿真中, 针对两种情况, 分别用 d_{2f}^1 和 d_{2f}^2 表示 f 方向领航者2与1的相对距离, 用 d_{2s}^1 和 d_{2s}^2 表示 s 方向领航者2与1的相对距离, 用 ϕ_2^1 和 ϕ_2^2 表示领航者2的偏航角, 用 v_{2x}^1 和 v_{2x}^2 表示领航者2在 x 方向的速度, 用 v_{2y}^1 和 v_{2y}^2 表示领航者2在 y 方向的速度, 用 x_2^1 和 x_2^2 表示领航者2的飞行轨迹.

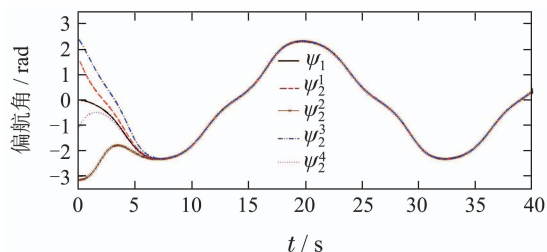


图 6 偏航角控制

Fig. 6 Yaw control

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

领航者	初始位置	初始速度	期望距离
1	(0, 0)	$(\sqrt{2}/2, \sqrt{2}/2)$	—
2	$(3\sqrt{2}/4, -9\sqrt{2}/4)$	(0, 0)	(2, 2)
2	$(-2\sqrt{2}, -\sqrt{2}/2)$	(0, 0)	(2, 2)

基于文献[21]所提方法, 本文首先选取表1中前两项参数进行仿真, 结果如图7所示.

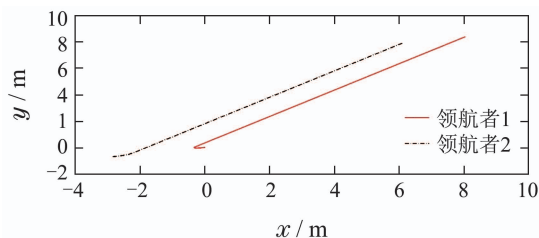


图 7 文献[21]领航者系统仿真结果

Fig. 7 Simulation result of leader system in [21]

明显看出, 图7中领航者1和领航者2虽能够保持期望的距离, 但不能同时满足相对距离 $(f_d, s_d) = (2, 2)$ 和相对方位 $\phi_d = \pi/4$. 即领航者2可能会以领航者1为圆心以期望距离为半径绕圈, 出现领航者系统自旋现象.

为了满足编队中相对距离和相对方位的要求, 同时避免产生上述现象, 本文使用改进后的基于图论法的编队控制方法进行仿真, 结果如图8所示.

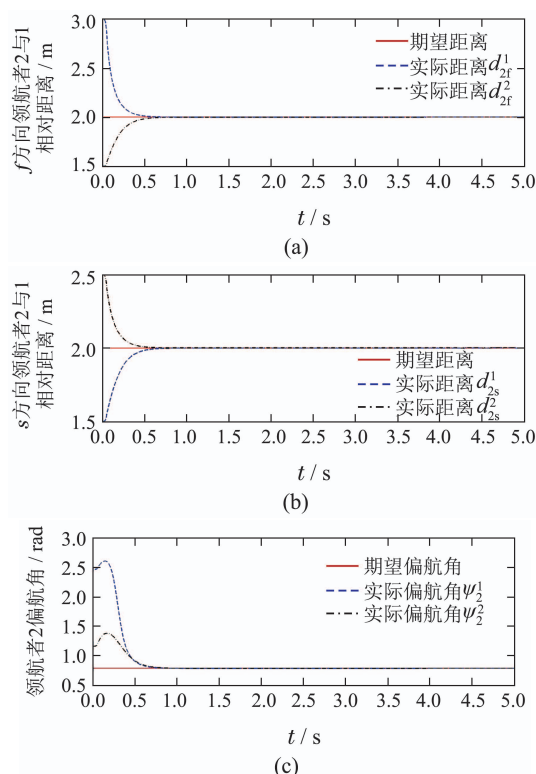


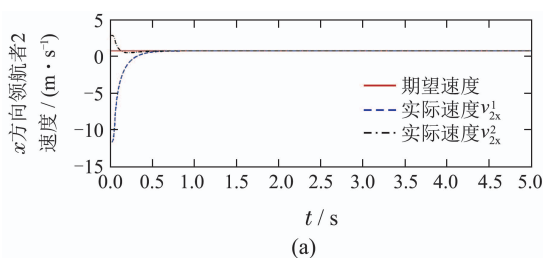
图 8 领航者系统相对距离及方位

Fig. 8 Relative distance and orientation between leaders

图8(a)为两种情况下领航者1和领航者2在 f 方向上的相对距离, 图8(b)为两种情况下领航者1和领航者2在 s 方向上的相对距离. 领航者2在其机体坐标系下, 通过改进后的距离反馈控制律, 控制速度使自身与领航者1在两个方向上的相对距离迅速达到指定值, 并且保证了两种情况下最终领航者间相对方位稳定在 $\phi_d = \pi/4$, 如图8(c)所示.

通过一段时间的飞行, 领航者2在导航坐标下的速度最终会收敛到领航者1所确定的编队飞行速度 $v_0 = (\sqrt{2}/2, \sqrt{2}/2)$, 如图9所示. 此时, 无论在何种情况下, 两架领航者的飞行速度, 相对距离及方位均达到设定值, 保证了二者之间的相对位置, 形成了稳定的领航者系统, 如图10所示.

图10中两种情况下的领航者系统均能同时满足相对距离与方位的要求, 达到编队需求, 证明使用改进后的编队方法能够避免整体自旋现象的出现.



(a)

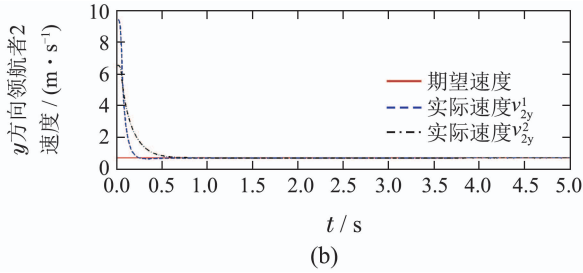


图9 领航者系统速度控制

Fig. 9 Speed control of leader system

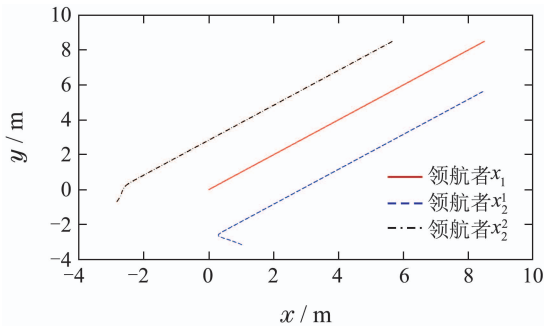


图10 领航者系统编队二维轨迹

Fig. 10 2-D trajectory of leader system

最后, 本文进行三架四旋翼三角形结构编队飞行的完整仿真. 假设三架四旋翼从不同的位置起飞, 在达到一定的高度后利用本文所提出的三角形结构编队控制方法开始编队控制. 完整编队的三维轨迹如图11所示, 三架四旋翼分别从 $x_1(4, 6, 0)$, $x_2(5, 1, 0)$, $x_3(0, 0, 0)$ 起飞, 最终飞行高度为 $z = 7$. 在指定高度多次改变领航者1的飞行速度时, 整个队形也会发生相应的改变. 在保持完整的三角形编队结构的同时, 其他两架四旋翼最终也可以达到领航者1所设定的编队飞行速度, 如图12所示.

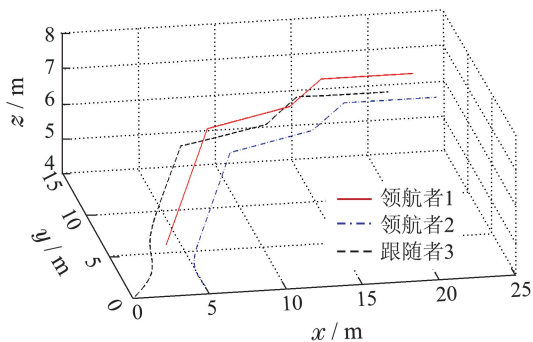


图11 完整编队三维轨迹

Fig. 11 3-D trajectory of the whole formation

通过以上仿真研究, 进一步验证了本文所提出的基于图论法的四旋翼三角形结构编队控制方法的适用性和稳定性.

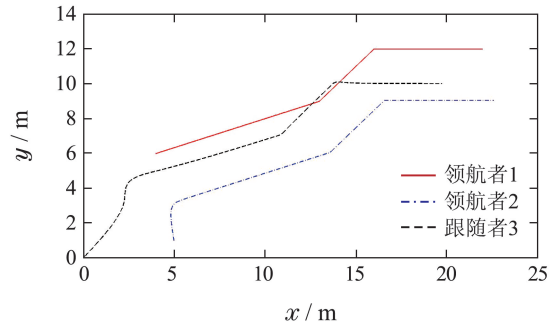


图12 完整编队二维轨迹

Fig. 12 2-D trajectory of the whole formation

5.2 GAZEBO环境仿真(Simulation in GAZEBO)

为了说明所提出的编队控制方法可以很好地应用到四旋翼实物平台上, 本文在半实物仿真环境GAZEBO中开展实验. 通过该仿真环境, 生成了三架真实的四旋翼模型, 并在此基础上进行算法验证.

首先本文验证了文献[21]所提出的基于自适应算法的编队控制如图13所示, 很明显在一段时间后三架不同编号无人机形成的编队队形整体自旋, 无法满足实际应用需求.

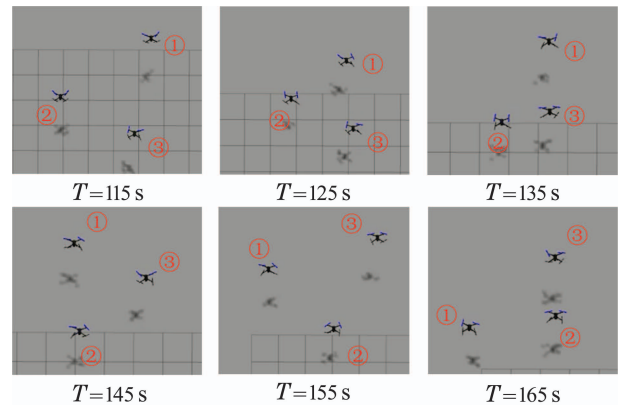


图13 GAZEBO环境仿真结果

Fig. 13 Simulation results in GAZEBO

接下来本文在GAZEBO环境中验证了改进后基于图论法的四旋翼编队控制, 如图14所示.

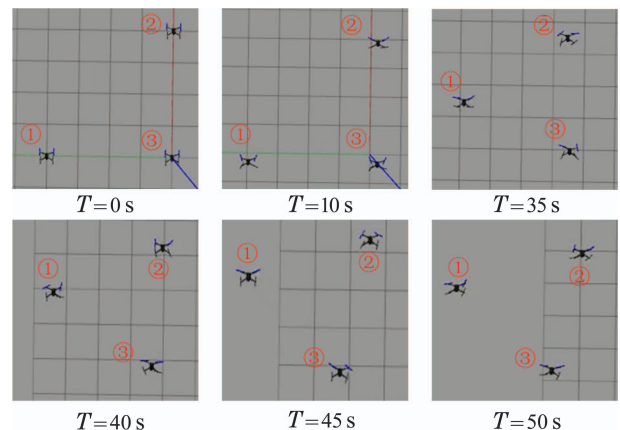


图14 GAZEBO环境改进仿真结果

Fig. 14 Improved simulation results in GAZEBO

图14($T = 0\text{ s}$)为三架四旋翼的初始状态, 其中左下角为领航者1、右上角为领航者2; 图14($T = 10\text{ s}$)中三架飞机同时起飞, 保持一定高度后开始基于所提出的改进算法进行三角形结构编队飞行. 图14($T = 35\text{ s}$)中位于上方的两架领航者已经保持了稳定的相对距离和方位, 跟随者正在调节自己的飞行姿态; 图14($T = 40\text{ s}, 45\text{ s}, 50\text{ s}$)中, 三架四旋翼最终形成了一个稳定的三角形结构编队并按照指定速度飞行, 期间无自旋现象出现, 达到了预期的实验要求.

6 结论(Conclusions)

为了更好地在真实环境实现四旋翼编队控制, 以完成复杂的任务需求, 本文基于图论法针对四旋翼三角形结构编队问题对文献[21]所提出的距离反馈控制律算法进行了改进, 使该方法更适用于真实四旋翼模型编队, 并且提高了编队的稳定性. 具体地, 将四旋翼视为图中的点, 四旋翼的通信状态及距离视为有向图中的边, 结合Leader-Follower思想, 本文将领航者系统细化为Leader-Follower控制, 通过引入方位角一致性控制律与机体坐标系速度控制律, 对两架领航者设计不同的控制方法, 使其能够在速度相同的前提下维持固定的距离和方位; 进而控制三架四旋翼间的相对距离保证其能够形成一个稳定的三角形结构. 最后, 通过MATLAB仿真验证了改进算法的收敛性和稳定性; 通过GAZEBO仿真进一步证明了改进算法能够使三架四旋翼快速形成一个稳定的三角形结构编队, 并按照一致的速度飞行. 为后续在真实环境中实现四旋翼编队飞行打下了坚实的理论基础.

参考文献(References):

- [1] QIU Huaxin, DUAN Haibin, FAN Yanming. Multiple unmanned aerial vehicle autonomous formation based on the behavior mechanism in pigeon flocks [J]. *Control Theory & Applications*, 2015, 32(10): 1298 – 1304.
(邱华鑫, 段海滨, 范彦铭. 基于鸽群行为机制的多无人机自主编队 [J]. 控制理论与应用, 2015, 32(10): 1298 – 1304.)
- [2] YIN Xiaoxiong. *Coordinative formation control of multiple quadrotors* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
(阴泉雄. 四旋翼的协调编队飞行控制 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.)
- [3] MA Mingyu, DONG Chaoyang, MA Siqian, et al. Coordinated control of multiple quadrotors formation on $SO(3)$ [J]. *Control Theory & Applications*, 2018, 35(9): 1229 – 1238.
(马鸣宇, 董朝阳, 马思迁, 等. 基于 $SO(3)$ 的多四旋翼无人机编队协同控制 [J]. 控制理论与应用, 2018, 35(9): 1229 – 1238.)
- [4] JIANG Wanyue, WANG Daobo, WANG Yin, et al. A vector field based method for multi-UAV simultaneous arrival [J]. *Control Theory & Applications*, 2018, 35(9): 1215 – 1228.
(蒋婉玥, 王道波, 王寅, 等. 基于时变向量场的多无人机编队集结控制方法 [J]. 控制理论与应用, 2018, 35(9): 1215 – 1228.)
- [5] OU Chaojie. *UAVs formation flight control* [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.
(欧超杰. 多无人机编队控制技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.)
- [6] LIU Chuhao. Multiple UAV formation control based on consensus control structure [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2015(s1): 481 – 485.
(刘楚豪. 基于集中式控制的多无人飞行器编队 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2015(s1): 481 – 485.)
- [7] REN W, ATKINS E. Distributed multi-vehicle coordinated control via local information exchange [J]. *International Journal of Robust & Nonlinear Control*, 2007, 17(10/11): 1002 – 1003.
- [8] REN W, BEARD R W. *Distributed Consensus in Multi-vehicle Cooperative Control: Theory and Applications* [M]. London: Springer, 2008.
- [9] CAO Z Q, TAN M, WANG S, et al. The optimization research of formation control for multiple mobile robots [C] // *Proceedings of the 4th World Congress on Intelligent Control and Automation*. Shanghai, China: IEEE, 2002.
- [10] SHAO Zhuang, ZHU Xiaoping, ZHOU Zhou, et al. Distributed formation keeping control of UAVs in 3-D dynamic environment [J]. *Control and Decision*, 2016, 31(6): 1065 – 1072.
(邵壮, 祝小平, 周洲, 等. 三维动态环境下多无人机编队分布式保持控制 [J]. 控制与决策, 2016, 31(6): 1065 – 1072.)
- [11] KHATIB O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots [C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Missouri: IEEE, 1985: 500 – 505.
- [12] CAO M, MORSE A S, YU C, et al. Controlling a triangular formation of mobile autonomous agents [C] // *Decision and Control*. New Orleans, LA, USA: IEEE, 2007: 3603 – 3608.
- [13] DESAI J P, OSTROWSKI J, KUMAR V. Controlling formations of multiple mobile robots [C] // *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Leuven, Belgium: IEEE, 1998: 2864 – 2869.
- [14] SOLEYMANI T, SAGHAFI F. Behavior-based acceleration commanded formation flight control [C] // *International Conference on Control Automation and Systems*. KINTEX, Gyeonggi-do, KOREA: IEEE, 2010: 1340 – 1345.
- [15] SHAO Zhuang, ZHU Xiaoping, ZHOU Zhou, et al. A formation keeping feedback control for formation flight of uavs [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2015, 33(1): 26 – 32.
(邵壮, 祝小平, 周洲, 等. 无人机编队机动飞行时的队形保持反馈控制 [J]. 西北工业大学学报, 2015, 33(1): 26 – 32.)
- [16] JIN Yuanxian, LI Wenguang, XIE Wenmiao. UAV formation control based on artificial potential field [C] // *IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference*. Shandong, China: IEEE, 2014.
(金远先, 李文光, 谢文苗. 基于人工势场法的无人机编队控制 [C] // 中国制导、导航与控制学术会议. 山东, 中国: IEEE, 2014.)
- [17] ZHU Xu, YAN Maode, ZHANG Changli, et al. UAV formation collision avoidance control method based on improved artificial potential field [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2017, 38(6): 961 – 968.
(朱旭, 闫茂德, 张昌利, 等. 基于改进人工势场的无人机编队防碰撞控制方法 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38(6): 961 – 968.)
- [18] MERCADO D A, CASTRO R, LOZANO R. Quadrotors flight formation control using a leader-follower approach [C] // *European Control Conference (ECC)*. Zurich, Switzerland: IEEE, 2013: 3858 – 3863.
- [19] HAO N D, MOHAMED B, RAFARALAHY H. Adaptive control for leader-follower formation of quadrotors [C] // *The Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems*. Cancun, Mexico: IEEE, 2015: 33 – 42.
- [20] NAGELI T, CONTE C, DOMAHIDI A, et al. Environment independent formation flight for micro aerial vehicles [C] // *International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Chicago, Illinois, USA: IEEE, 2014: 1141 – 1146.
- [21] GUO J, LIN Z, CAO M, et al. Adaptive control schemes for mobile robot formations with triangularised structures [J]. *IET Control Theory & Applications*, 2010, 4(9): 1817 – 1827.

作者简介:

赖云晖 (1994–), 男, 硕士研究生, 目前研究方向为四旋翼无人机协同控制, E-mail: laiyunhui69@gmail.com;

李 瑞 (1973–), 女, 副教授, 目前研究方向为多智能体协同控制与飞行器控制, E-mail: lirui@uestc.edu.cn;

史莹晶 (1975–), 男, 副教授, 目前研究方向为多智能体协同控制、飞行器控制及非线性控制, E-mail: shiyingjing@163.com;

贺 亮 (1978–), 男, 研究员, 目前研究方向为空间机器人技术, E-mail: aerospace@vip.sina.com.