

四旋翼飞行器控制系统设计及可视化仿真

马鑫源, 李燕燕, 梁雅雯, 张 勇, 陈 琦

(天津商业大学信息工程学院, 天津 300134)

摘 要: 直接对四旋翼飞行器控制系统进行调试, 极易引发危险, 严重时还会造成人员伤亡, 针对目前多采用数值仿真验证方法难以直接展示控制效果问题, 本文设计一种基于Matlab/SimMechanics软件的四旋翼飞行器飞行控制可视化仿真系统, 首先, 基于Simulink完成了四旋翼飞行器控制系统设计, 然后采用PID控制算法实现了四旋翼飞行器飞行状态直观姿态和飞行数据分析功能, 最后通过仿真可以得出结论, 所设计的四旋翼飞行器控制可视化仿真系统通过三维可视化窗口, 可实时完成四旋翼飞行器实时控制算法演示和仿真, 具有重要的应用价值。

关键词: 四旋翼飞行器; SimMechanics; 可视化仿真系统

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A

Design and Visual Simulation of Quadrotor Control System

MA Xinyuan, LI Yanyan, LIANG Yawen, ZHANG Yong, CHEN Qi

(School of Information Engineering, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)

Abstract: The direct debugging of the four rotor vehicle control system could easily cause danger and personal injury. In view of the problem that it is difficult to directly display the control effect by using the numerical simulation verification method at present, a visual simulation system of the four rotor vehicle flight control based on MATLAB / SimMechanics software was designed in this paper. Firstly, the four rotor vehicle flight control system was designed based on Simulink, and then the PID control algorithm was used to realize the intuitive attitude for flight status and flight data analysis function of the four rotor vehicle. Finally, through the simulation, it could be draw a conclusion that the visual control simulation system of four rotor vehicle could achieve the real-time control algorithm demonstration and simulation of the four rotor vehicle through the three-dimensional visualization window, which is of great application value.

Keywords: quadrotor; SimMechanics; visual simulation system

1 引言(Introduction)

四旋翼飞行器是一个典型的不稳定、时变、强耦合、高度非线性的欠驱动系统。其由四个旋翼的推力驱动, 却具有六个运动自由度, 六个自由度之间又是相互耦合的。四旋翼飞行器的这些特点给飞行控制器设计带来了较大的困难。国外一些研究者已经使用三维模型研究如六足机器人等复杂机器人结构^[1]; Fred^[2]、Gaifullin^[3]等已开始对四旋翼飞行器实行三维建模仿真分析。国内有研究者如历小伟, 郭玉英^[4]采用试凑法与理论推导法结合进行调参/仿真; 杨则允、李猛孙、钦鹏^[5]通过搭建simulink模型进行数值仿真。若只采用Matlab/Simulink对控制进行设计及数值仿真验证, 无法将四旋翼飞

行器的六个自由度的数据进行整合, 直观的给研究者展现四旋翼飞行器的实时位置及其姿态状况, 因此需要搭建一个三维可视化仿真环境, 通过参比实物飞行器搭建出飞行器的三维实体模型, 在实物飞行器试飞前对控制系统进行可视化仿真, 以验证控制系统是否符合设计要求。SimMechanics是一种基于Simulink的研究与分析仿真环境平台, 其可为动力机械系统及其控制系统提供简明有效地建模分析手段, 所有工作都在该环境中完成。它给予了许多与实际系统相关的部件, 如: 刚体、铰链、坐标系、执行机构、传感器等。利用这些模块, 即可以方便地构建复杂机械系统的模型, 又能对机械系统或Simulink设计的任何控制器进行单独分析, 并与其

他动态系统一起实现综合仿真^[6]。

本文设计了一种基于Matlab/SimMechanics的四旋翼飞行器可视化仿真控制系统。首先通过三维建模建立现有四旋翼飞行器的三维实体模型,随后在Simulink中构建四旋翼飞行器控制器模块,并与搭建好的四旋翼飞行器模型相连接,即可对四旋翼飞行器的控制算法进行可视化仿真分析。在所设计的可视化仿真系统实验环境下,可以完成四旋翼飞行器进行飞行测试,模拟实际飞行状态,并对控制器参数进行合理调试和可靠性验证,评估四旋翼飞机实际飞行状态,其大大提高了飞行控制器设计的效率,提前发现实际飞行测试控制器设计中的不合理,来减少不必要的损失,确保实际飞行测试的安全。

2 四旋翼飞行器的基本工作原理(Basic working principle of quadrotor)

四旋翼飞行器的工作原理主要通过控制分布在四个角落的电机旋转力度的大小和方向,驱动螺旋桨叶片旋转产生升力,从而达到控制飞行器的姿态和位置的目的。四旋翼飞行器能够在空中完成八种不同的运动,分别是竖直上升、竖直降落、前向飞行、后向飞行、左向飞行、右向飞行、顺时针变向、逆时针变向。下面详细介绍各个动作的工作原理。

2.1 竖直上升和竖直下降

四旋翼飞行器飞行至空中稳定后,四个电机M1、M2、M3、M4转速同时增大或同时减小,此时可以进行竖直上升或竖直降落运动,图1为竖直上升运动原理图,图2所示为竖直降落原理图。

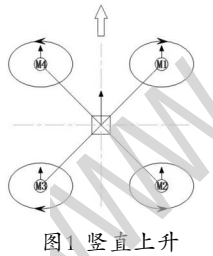


图1 竖直上升

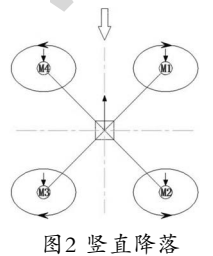


图2 竖直降落

2.2 前向运动和后向运动

四旋翼飞行器飞行至空中稳定后,电机M2、M3转速增大,电机M1、M4转速不变或者减小,可完成前向飞行,图3

为前向飞行原理图。电机M2、M3转速减小或不变,电机M1、M4转速增加,可完成后向飞行,图4为后向飞行原理图。

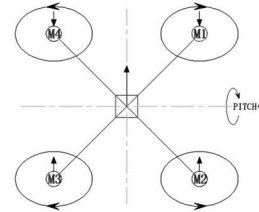


图3 前向飞行

Fig.3 Forward motion

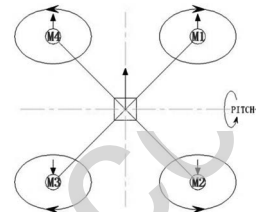


图4 后向飞行

Fig.4 Backward motion

2.3 左向运动和右向运动

四旋翼飞行器飞行至空中稳定后,电机M1、M2转速增大,电机M3、M4转速不变或减小,可完成左向飞行,图5为左向飞行原理图。电机M1、M2转速减小或不变,电机M3、M4转速增加,可完成右向飞行,图6为右向飞行原理图。

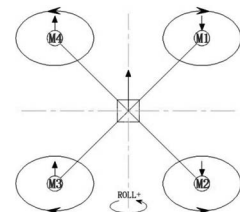


图5 左向飞行

Fig.5 Leftward motion

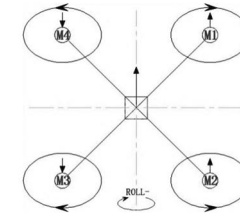


图6 右向飞行

Fig.6 Rightward motion

2.4 顺时针变向和逆时针变向

四旋翼飞行器飞行至空中稳定后,电机M1、M3转速增大,电机M2、M4转速不变或减小,可完成顺时针变向飞行,图7为顺时针变向飞行原理图。电机M1、M3转速减小或不变,电机M2、M4转速增加,可完成逆时针变向飞行,图8为逆时针变向飞行原理图。

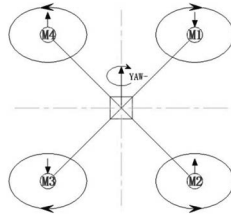


图7 顺时针变向飞行

Fig.7 Clockwise change

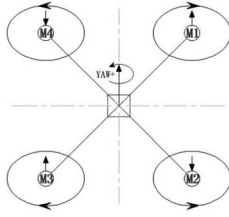


图8 逆时针变向飞行

Fig.8 Turn counterclockwise

3 四旋翼飞行器算法(Explanation of quadrotor algorithm)

3.1 姿态解算简介

姿态解算是飞行器飞行的关键技术之一，它指控制器读取自身传感器数据，实时计算四旋翼飞行器的姿态角，例如横滚角、俯仰角、偏航角的信息，控制器根据这些信息即可计算四个电机的输出量，使飞行器保持平衡稳定或者保持某一倾斜角往设定方向飞行。姿态解算速度和精度直接关系到飞行器飞行中的稳定性和可靠性^[7]。关于姿态解算有很多方法，扩展型卡尔曼滤波和互补滤波其中两种经典的方法^[8]。其中互补滤波算法对系统要求较低，计算量小，而扩展型卡尔曼滤波算法精度高，但计算量大，且需要建立精确的动力学模型，因此在四旋翼飞行器的姿态计算中常应用互补滤波算法。

3.2 软件姿态解算

欧拉角描述一次平面旋转(坐标变换)，如图9所示。

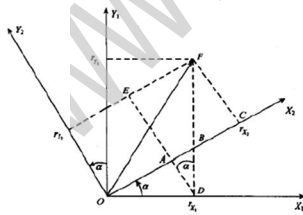


图9 欧拉角平面旋转

Fig.9 Euler angle plane rotation

坐标系绕旋转 α 角后得到坐标系，在空间中有一个矢量在坐标系中的投影为 r_1 ，在 x_1 轴上的投影为 $r_1 \cos \alpha$ ，由于旋转绕 x_3 轴进行， Z 坐标不变，即有：

$$\begin{aligned} r_{x2} &= OA + AB + BC \\ &= OD \cos \alpha + BD \sin \alpha + BF \sin \alpha \\ &= r_{x1} \cos \alpha + r_{y1} \sin \alpha \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} r_{y2} &= DE - AD \\ &= DF \cos \alpha - OD \sin \alpha \\ &= r_{y1} \cos \alpha - OD \sin \alpha \\ &= r_{y1} \cos \alpha - r_{x1} \sin \alpha \end{aligned} \quad (2)$$

$$r_{z2} = r_{z1} \quad (3)$$

转换成矩阵形式表示为：

$$\begin{bmatrix} r_{x2} \\ r_{y2} \\ r_{z2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{x1} \\ r_{y1} \\ r_{z1} \end{bmatrix} \quad (4)$$

整理：

$$r^1 = \begin{bmatrix} r_{x1} \\ r_{y1} \\ r_{z1} \end{bmatrix}, r^2 = \begin{bmatrix} r_{x2} \\ r_{y2} \\ r_{z2} \end{bmatrix}$$

旋转阵

$$C_1^2 = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

在三维空间中的欧拉角旋转三次：

$$O - X_n Y_n Z_n \xrightarrow{\text{绕 } Z_n \text{ 轴旋转 } \varphi} O - X_1 Y_1 Z_1 \xrightarrow{\text{绕 } X_1 \text{ 轴旋转 } \theta} O - X_2 Y_2 Z_2 \xrightarrow{\text{绕 } Y_2 \text{ 轴旋转 } \gamma} O - X_b Y_b Z_b$$

$$C_n^b = C_2^b C_1^2 C_n^1 = \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \gamma \cos \varphi + \sin \gamma \sin \varphi \sin \theta & -\cos \gamma \sin \varphi + \sin \gamma \cos \varphi \sin \theta & -\sin \gamma \cos \varphi \\ \sin \varphi \cos \theta & \cos \varphi \cos \theta & \sin \theta \\ \sin \gamma \cos \varphi - \cos \gamma \sin \varphi \sin \theta & -\sin \gamma \sin \varphi - \cos \gamma \cos \varphi \sin \theta & \cos \gamma \cos \varphi \end{bmatrix}$$

欧拉角微分方程：

$$\begin{bmatrix} \dot{\gamma} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \frac{1}{\cos \theta} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \gamma \sin \theta & \cos \gamma \sin \theta \\ 0 & \cos \theta \cos \gamma & -\sin \gamma \cos \theta \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \cos \theta \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \omega_{Ebx}^b \\ \omega_{Eby}^b \\ \omega_{Ebz}^b \end{bmatrix} \quad (7)$$

上式中左侧是更新后的欧拉角，对应roll、pitch、yaw。右侧是上个周期测算出来的角度，三个角速度为四旋翼飞行器计算间隔为 T 陀螺角速度。求解此微分方程可解算出当前的欧拉角。

4 四旋翼飞行器控制系统设计及可视化仿真 (Design and visual simulation of four-rotor aircraft control system)

4.1 搭建四旋翼飞行器可视化仿真模型

在Matlab软件里的SimMechanics附件中提供了大量可建立运动机构模型模块，这些模块可以通过Simulink连接设计完成控制器，从而完成综合系统仿真。SimMechanics在三维建模方面存在一定的局限性，为了弥补这方面的不足，本文依据现有的四旋翼飞行器的形状和尺寸，如图10所示，采用三维绘图软件完成四旋翼飞行器的三维实体建模，将其置于SimMechanics中，并且与设计好的飞行器控制器进行连接。四旋翼飞行器主体由一个机体和四个加装螺旋桨的电机构成，机体与电机间通过单自由度模块连接构成一个完整的四旋翼飞行器，四旋翼飞行器三维实体模型如图11所示。

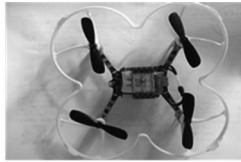


图10 四旋翼飞行器

Fig.10 A quadrotor

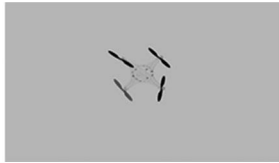


图11 四旋翼飞行器三维实体模型

Fig.11 Three-dimensional model of a quadrotor

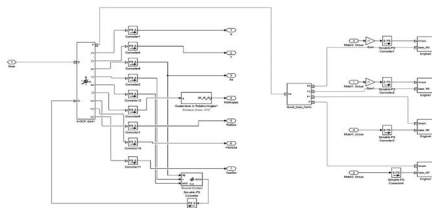


图12 四旋翼飞行器SimMechanics模型

Fig.12 SimMechanics model of a quadrotor

SimMechanics内部提供了驱动和传感器模块，搭建的仿真模型可以便捷地与Simulink中的其他模块进行数据传输，可在同一条件下构建控制器和受控对象模型进行仿真模拟。四旋翼飞行器具有六个空间自由度，因此在地坐标系与四旋翼飞行器模型之间必须具有六自由度模块，并且必须拥有角度、角速度及位置传感器^[9]。为使四旋翼飞行器模型产生升力，需要对模型中四个单自由度模块添加驱动力矩模块和由力矩产生的转速传感器模块，将其传递给对应螺旋桨，带动螺旋桨转动。最后调整模块里的重力方向与仿真图中的Z轴方向保持一致，最终完成四旋翼无人机在SimMechanics中模型，如图12所示。

4.2 四旋翼飞行器控制系统设计

PID控制算法实际上就是对偏差 $e(t)$ 进行比例、积分、微分变换的运算^[10]，具备结构简单、成本低、操控方便、稳、准、快等优点，在工业控制中应用十分广泛。本文采用串级PID控制算法作为四旋翼飞行器控制系统的主要算法，来控制四旋翼飞行器的飞行姿态，串级PID控制器结构图如图13所示。

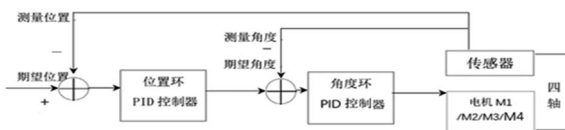


图13 串级PID控制器结构图

Fig.13 Structure diagram of cascade PID controller

在串级PID控制器中，内环选用PID控制器控制飞行器姿态角，simulink程序如图14所示，外环采用PD控制器控制飞行器位置，simulink程序如图15所示。

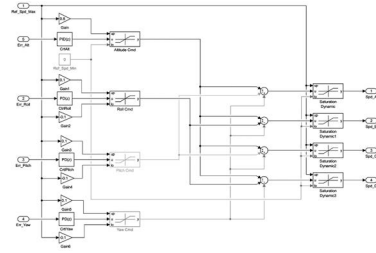


图14 内环PID控制器

Fig.14 Inner loop PID controller

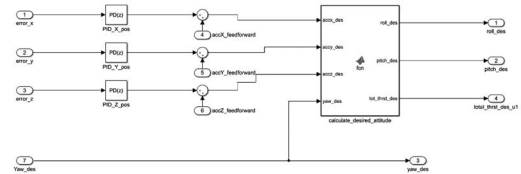


图15 外环PD控制器

Fig.15 External ring PD controller

图16为在Simulink中搭建的四旋翼飞行器控制系统的仿真模型。系统输入量即为目标预期位置 X_{des} 、 Y_{des} 、偏航角 $accX_{fdfrwd}$ 、 $accY_{fdfrwd}$ 、 $accZ_{fdfrwd}$ ，由位置控制器计算出期望的滚转角 yaw_{des} 、俯仰角 $roll_{des}$ 、 $pitch_{des}$ ，由姿态控制器和运动学逆解算法，四旋翼飞行器每个电机所需转矩控制量由期望姿态角和高度所计算出，将转矩控制量导入四旋翼飞行器三维模型，并在Simulink模块里构建其控制器模块，可在可视化仿真系统里对其进行校验。

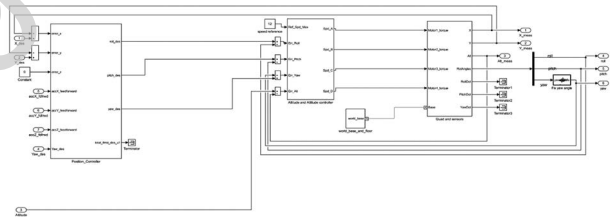


图16 四旋翼飞行器控制系统的Simulink仿真模型

Fig.16 Simulink simulation model of the four-rotor aircraft control system

4.3 四旋翼飞行器控制系统可视化仿真

为验证四旋翼飞行器控制系统性能，本文对所设计的控制器进行模拟仿真，初始状态四旋翼飞行器的默认位置为： $X_{des}=0$ 、 $Y_{des}=0$ 、 $Altitude=0$ ；期望的输入轨迹为： $X_{des}=0.5*\sin(t)$ 、 $Y_{des}=0.5*\cos(t)$ 、 $Altitude=1$ ，输出的四旋翼飞行器的实际轨迹为 X 、 Y 、 Alt ，图17即为四旋翼无人机的可视化动态仿真图，其中图18(a)为四旋翼飞行器的侧视效果图，图18(b)则为四旋翼飞行器的俯视效果图。 X 轴方向的轨迹追踪曲线如图18所示，从图中可观察到从起飞至飞行平稳后，系统基本可以追踪上 X 轴的输入。高度的追踪曲线如图19所示，由图可观察到在1s左右的时候高度存在一个超调量，4s左右恢复到目标位置，跟踪误差基本为零。

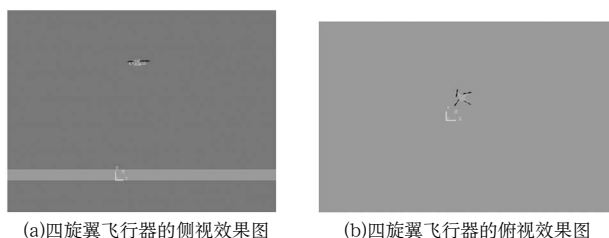


图17 四旋翼无人机的可视化运动仿真图

Fig.17 Visual motion simulation diagram of a four-rotor UAV

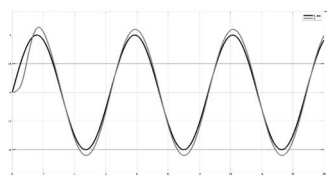


图18 X轴方向的期望输入与输出

Fig.18 Expected inputs and outputs in the X-axis direction

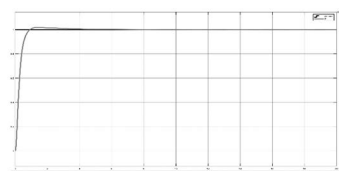


图19 Z轴方向的期望输入与输出

Fig.19 Expected input and output in the Z-axis direction

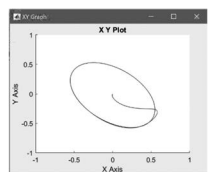


图20 四旋翼飞行器仿真飞行轨迹

Fig.20 Flight trajectory of four-rotor aircraft simulation

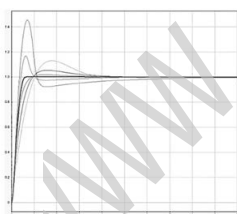


图21 四旋翼飞行器高度响应曲线

Fig.21 Height response curve of four-rotor aircraft

图20为四旋翼飞行器在期望输入下的仿真飞行轨迹,轨迹图形符合预期。整个模拟过程在仿真系统里清晰简洁,效果真实,数据准确。基于此四旋翼飞行器模型,也能方便的对控制器的参数进行整定。一是通过对simulink控制器中的PID模块直接手动进行调节参数调节;二是可以通过PID模块中提供的Tune方法,让系统对系统被控对象进行辨识,通过设定期望的系统响应性能,simulink通过后台模拟仿真给出相应PID的PID参数建议值,同时,在simulink中能轻松直观的对不同参数下系统的响应进行比较分析,直观地看到不同参数下飞行器的3D飞行效果,可减少调节PID参数的盲目性,加

快控制器参数整定速度。如图21为系统在定高飞行实验中,不同的P值下四旋翼飞行器的高度变化曲线。

5 结论(Conclusion)

本文经过导入三维模型,快速搭建实现了四旋翼飞行器的SimMechanics可视化仿真模型,并通过与Simulink模块所实现的PID控制器相结合,构造了一个四旋翼飞行器控制仿真系统。所构建的四旋翼飞行器控制仿真系统可以实现实体无人机控制算法的仿真及分析等功能,并能够直观地观察到四旋翼飞行器的即时飞行状态,便捷灵活,效果逼真。四旋翼飞行器控制仿真系统能够在开发过程中加深对四旋翼飞行器控制算法的仿真研究,降低开发成本。

参考文献(References)

- [1] Ludovico Minati, Mattia Frasca, Natsue Yoshimura. Versatile Locomotion Control of a Hexapod Robot Using a Hierarchical Network of Nonlinear Oscillator Circuits[J]. IEEE Access, 2018, 6(99): 8042-8065.
- [2] Fred Delcomyn, Mark E Nelson. Architectures for a biomimetic hexapod robot[J]. Robotics & Autonomous Systems, 2000, 30(2): 5-15.
- [3] A.M. Gaifullin, O.V. Animitsa, I.S. Bosnyakov. Modeling of Aircraft Flight Through the Wake Vortex[J]. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 2019, 60(2): 314-322.
- [4] 历小伟, 郭玉英. 四旋翼飞行器的动力学建模与飞行控制[J]. 自动化与仪器仪表, 2017(1): 130-132.
- [5] 杨则允, 李猛, 孙钦鹏. 四旋翼无人机控制系统仿真设计[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(4): 68-71.
- [6] 陈云. 基于SimMechanics和VRML的6-dof并联振动平台的运动仿真[D]. 吉林大学, 2012: 66-73.
- [7] 蔡明成. 基于STM32的四轴飞行器控制系统的设计与实现[D]. 安徽理工大学, 2017: 44-52.
- [8] 张栋, 焦嵩鸣, 刘延泉. 互补滤波和卡尔曼滤波的融合姿态解算方法[J]. 传感器与微系统, 2017, 36(3): 62-66.
- [9] 许江阴, 赵宏强, 邓宇. 四旋翼无人机可视化轨迹跟踪仿真系统[J]. 计算机测量与控制, 2017(03): 138-141.
- [10] 徐巍. 基于姿态控制的四旋翼飞控系统研究[D]. 南昌航空大学, 2016: 74-80.

作者简介:

马鑫源(1998-), 男, 本科生. 研究领域: 虚拟仿真.

李燕燕(1998-), 女, 本科生. 研究领域: 控制算法.

梁雅雯(1996-), 女, 本科生. 研究领域: 系统仿真.

张勇(1978-), 男, 博士, 副教授. 研究领域: 智能检测与信息处理. 本文通讯作者.

陈琦(1971-), 女, 博士, 副教授. 研究领域: 智能决策与信息处理.