

# 基于脑机接口的无人机编队控制系统设计



李家伟,张洪欣,徐瑞林  
北京邮电大学,北京 100088

**摘要:**随着脑机接口(BCI)技术的不断发展,越来越多基于脑机接口的应用被不断研究并实现。为提高无人机编队的工作效率,针对无人机编队的常用控制命令,本文设计了一种8目标的稳态视觉诱发电位(SSVEP)脑机接口控制无人机编队系统。该系统允许用户通过脑机接口的8个命令对无人机编队进行队形切换等灵活控制。本系统采用典型相关分析(CCA)方法对脑电进行解码,并将解码结果使用Leader-Follower的方法对无人机编队进行控制。来自6例健康受试者的试验结果表明,研究所设计的脑控无人机编队系统具有较好的性能,平均识别准确率达97%,验证了基于非侵入式脑机接口技术控制无人机编队的可行性。

**关键词:**脑机接口;无人机编队;SSVEP;CCA;Leader-Follower

中图分类号:V279

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2023.02.014

近年来,随着科技的进步,人们对于大脑认知的渴望伴随计算机硬件计算速度的飞速提升催生一种新兴的人机交互技术——脑机接口(brain-computer interface, BCI)。脑机接口将人脑或动物脑与外部设备之间直接建立起一座通信桥梁,实现了大脑将意念信息直接传递给外部设备,打破了人们对于“意念控物”只存在于科幻电影中的认知。

脑机接口系统通常分为侵入式<sup>[1]</sup>和非侵入式两类。侵入式脑机接口需要将电极植入颅骨来采集神经信号,通常具有较高的信噪比,但是存在手术风险;非侵入式脑机接口无需手术,可以通过电信号采集设备直接采集头皮脑电(EEG)。

稳态视觉诱发电位(SSVEP)是指人在注视一个以固定频率闪烁的目标时,大脑视觉皮层可以产生一个相同频率的混合基频及倍频响应信号<sup>[2]</sup>。目前,SSVEP的相关技术已经十分成熟,很多相关算法都可以在无训练或较少训练的条件下实现较高的准确率和信息传输速率。也是因为这些特性,通过SSVEP诱发脑电并用于具体的应用是可行的。在近几年的世界机器人大会上,基于SSVEP打字<sup>[3]</sup>、控

制轮椅<sup>[4]</sup>、控制机械臂<sup>[5]</sup>等应用相继亮相。

无人机编队飞行是各国军队<sup>[6]</sup>及科研工作者<sup>[7]</sup>一直以来追求的技术。其关键技术问题主要包括队形设计、气动耦合、队形动态调整、航机规划、无人机间的信息交互,以及编队飞行控制等问题。

Leader-Follower<sup>[8]</sup>方法是目前无人机编队控制<sup>[9]</sup>中最常用的方法之一。先给Leader一个预定轨迹,Follower和Leader保持一定的构型,同时二者速度保持一致,这种相对运动的模式,可将无人机编队系统队形控制问题转换成单个个体的运动情况研究。

目前,市面上的无人机编队控制主要通过操纵杆或其他控制工具来完成,并且一人只能操纵一架无人机,无人机编队就得由多人来操控。

本文主要设计了一种基于SSVEP的脑机接口无人机编队的控制系统,该系统可提高无人机编队的工作效率及解放操纵者的双手,操作人员可以通过此系统同时控制多架无人机执行任务。因此,脑机接口控制无人机编队的研究在军事与民用领域都具有重大意义。

收稿日期:2022-10-20;退修日期:2022-12-10;录用日期:2023-01-12

基金项目:航空科学基金(2019ZG073001);国家自然科学基金(62006024);北京邮电大学中央高校基本科研专项资金(2019XD17);广东省重点领域研发计划(2018B030339001);国家重点基础研究发展规划项目(2017YFB1002505)

引用格式:Li Jiawei, Zhang Hongxin, Xu Ruilin. Design of UAV formation control system based on brain-computer interface data [J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(02):104-110. 李家伟,张洪欣,徐瑞林. 基于脑机接口的无人机编队控制系统设计[J]. 航空科学技术, 2023, 34(02):104-110.

### 1 系统总体设计

本文系统设计了一种基于 SSVEP 的脑控无人机编队系统。系统逻辑如图 1 所示,该系统架构是以中央控制器为核心的一种星形架构,包括刺激系统、采集系统、算法系统、无人机编队控制系统在内的所有子系统的运行逻辑全部受到中央控制器的控制。准备阶段,中央控制器会控制刺激系统与算法系统完成“握手”并控制刺激系统产生刺激界面。试验时使用 8 导联 Neuracle 脑电采集设备进行脑电信号采集,受试者注视刺激目标产生相应脑电数据会被脑电放大器采集并发送给采集系统,采集系统完成脑电数据拼接及降采样等工作后,将数据传递给算法系统,算法系统采用基于 CCA<sup>[10]</sup>的 SSVEP 算法用作信号识别,经过该计算后将反馈结果反馈给中央控制器,中央控制器会依据反馈结果向刺激系统和无人机编队控制系统发送指令,无人机编队控制系统会依据飞行控制的指令向无人机编队传递飞行信号,以此来实现脑电数据对无人机编队的飞行控制。

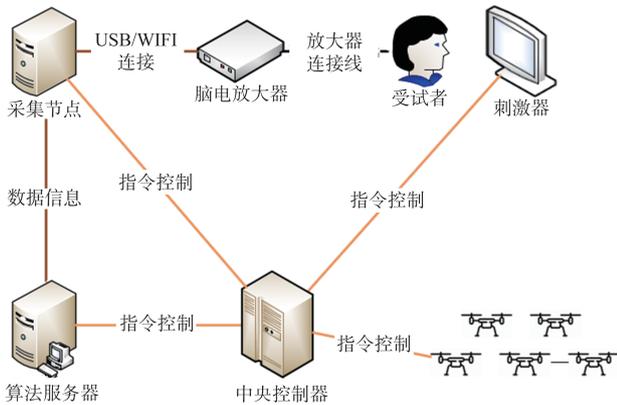


图1 基于脑机接口数据的无人机编队飞行控制  
Fig.1 Flight control of UAV formations based on brain-computer interface data

系统消息通信如图 2 所示,该系统以 Kafka 消息中间件作为通信平台,采用发布—订阅模式进行消息通信,所有的数据均以二进制的形式由生产者上传至 Kafka。首先订阅者先进行消息的订阅,当有发布者发送消息到服务器中时,服务器便会自动给订阅的用户分发消息。

### 2 无人机编队仿真系统

无人机编队系统仿真是基于 Ubuntu 系统下 ROS 和 Gazebo 的物理仿真环境。该仿真系统通过 Gazebo\_ros 功能包进行 ROS 和 Gazebo 的连通,通过 ROS 提供的 Mavros 功能包根据 PX4 提供的 Mavlink 数据通信协议对 PX4 提供

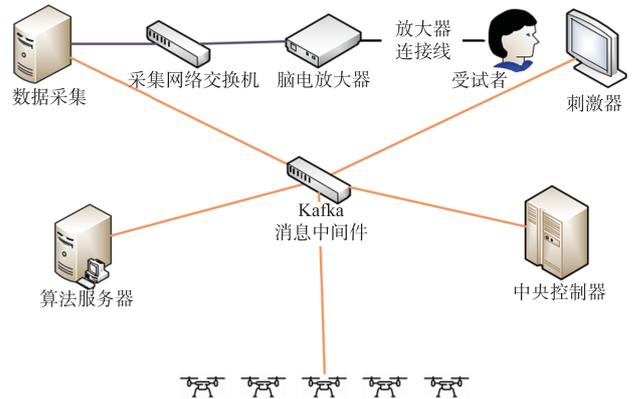


图2 脑控无人机编队消息通信连接图  
Fig.2 Brain-controlled drone formation message communication connection diagram

的 Firmware 功能包进行数据的采集和处理,以达到 ROS 对 Firmware 飞控仿真的连接。通过 Firmware 和 Mavros 组成的无人机,根据 Gazebo 提供的真实物理环境可以搭建一套完整的无人机仿真环境。无人机编队仿真环境解决方案如图 3 所示。

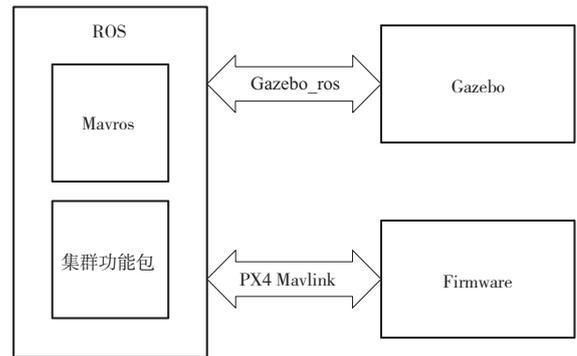


图3 无人机编队仿真框架图  
Fig.3 UAV formation simulation framework diagram

从该无人机编队仿真框架图中可以看出,除了集群功能包以外都由 ROS 以及 PX4 提供,因此该系统还需设计一个无人机编队软件框架图。对于无人机编队,该系统设计了一个包含无人机编队的解锁、上锁、起飞、降落模块,无人机编队队形切换模块,无人机控制指令模块,以及无人机编队状态实时反馈信息。编队的软件框架图如图 4 所示。

#### 2.1 单无人机非线性建模

在对无人机编队控制模块进行设计前需要实现对单个无人机的控制。为了清楚描述无人机的位置与姿态,需建立一个适当的坐标系。惯性坐标系与机体坐标系如图 5 所示。

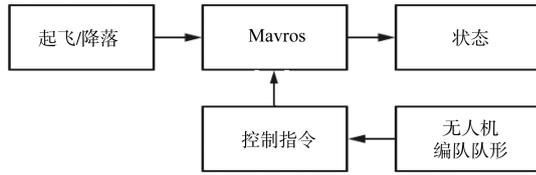


图4 无人机编队软件框架图

Fig.4 Drone formation software framework diagram

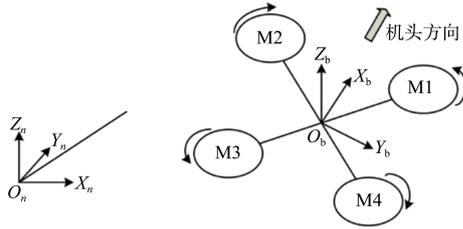


图5 惯性坐标系与机体坐标系

Fig.5 Inertial coordinate system and body coordinate system

(1) 惯性坐标系: 惯性坐标系是以地球为参考目标的坐标系, 以  $O_n$  为原点, 以  $O_n X_n$ 、 $O_n Y_n$ 、 $O_n Z_n$  三条互相垂直的直线为坐标轴建立的坐标系即为惯性坐标系。

(2) 机体坐标系: 机体坐标系是以无人机质点  $O_b$  为坐标原点, 根据右手定则建立的笛卡儿机体坐标系。机头所在方向为坐标的正半轴  $X_b$ , 机身横截面的方向为  $Y_b$ , 二者互相垂直,  $Y_b$  正方向为机体的右侧。根据右手定则可知,  $Z_b$  轴垂直于  $X_b Y_b$  所在的平面且方向向上。

为了让无人机与地面坐标系保持一致, 对应姿态角做如下定义滚转角, 记为  $\phi$ , 其取值范围在  $[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$ ; 俯仰角记为  $\theta$ , 其取值范围在  $[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$ ; 偏航角记为  $\psi$ , 其取值范围在  $[-\pi, \pi]$ 。

其中, 滚转角的定义为机体轴  $OZ$  与通过机体轴  $OX$  的铅垂直线的夹角, 从集体后方观测, 右侧向下倾斜角度为正。

俯仰角的定义为机体绕  $OY$  轴旋转后,  $OX$  轴与水平面之间形成的夹角, 无人机头部向上仰起时角度为正。

偏航角的定义为机体轴  $OX$  在水平面上的投影与机体轴  $OY$  之间的夹角, 机体向北偏东方向偏航时角度为正。

使用方向余弦法后将三次基本旋转矩阵相乘可得到坐标系的旋转矩阵

$$R = R(z, \psi)^{-1} R(y, \theta)^{-1} R(x, \phi)^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & \cos \psi \sin \theta \sin \phi - \sin \psi \cos \phi & \cos \psi \sin \theta \cos \phi + \sin \psi \sin \phi \\ \cos \theta \sin \psi & \sin \psi \sin \theta \sin \phi + \cos \psi \cos \phi & \sin \psi \sin \theta \sin \phi - \cos \psi \sin \phi \\ -\sin \theta & \sin \phi \cos \theta & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

根据机体坐标系的旋转矩阵、无人机的运动方程<sup>[11]</sup>、惯性矩阵以及无人机沿坐标轴的力矩可得到完整的无人机动力学非线性模型

$$\begin{cases} \ddot{x} = u_1 (\cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi) - \frac{K_1}{m} \dot{x} \\ \ddot{y} = u_1 (\sin \phi \sin \theta \cos \psi - \cos \phi \sin \psi) - \frac{K_2}{m} \dot{y} \\ \ddot{z} = u_1 (\cos \phi \cos \psi) - g - \frac{K_3}{m} \dot{z} \\ \ddot{\theta} = u_2 - \frac{K_4 l}{I_1} \dot{\theta} \\ \ddot{\psi} = u_3 - \frac{K_5 l}{I_2} \dot{\psi} \\ \ddot{\phi} = u_4 - \frac{K_6 l}{I_3} \dot{\phi} \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $u_i (i=1,2,3,4)$  为虚拟  $a$  控制输入, 定义如下

$$\begin{cases} u_1 = b(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2) = \sum_{i=1}^n F_i \\ u_2 = b(\Omega_4^2 - \Omega_3^2) = F_4 - F_3 \\ u_3 = b(\Omega_2^2 - \Omega_1^2) = F_2 - F_1 \\ u_4 = d(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 - \Omega_3^2 - \Omega_4^2) \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $g$  为重力加速度,  $m$  为机体质量,  $\Omega$  为电机转速,  $b$  为电机的拉力系数,  $l$  为无人机几何中心到电机中心的距离。  $F_i (i=1,2,3,4)$  代表每个螺旋桨的升力, 可视为控制的输入。

此外,  $\phi, \theta, \psi$  分别表示无人机的滚转角、俯仰角、偏航角。

## 2.2 单无人机控制

根据无人机数学模型(2), 由于欠驱动特性, 存在4个输入就不能跟踪6个自由度。这里采用的控制方案如图6所示。给无人机发送参考指令, 即三维坐标系下的期望值和滚转角  $x_d, y_d, z_d, \phi_d$ , 通过位置控制器进行无人机空间位置的跟踪, 计算出为了跟踪该位置的另两个角  $\theta_d, \psi_d$ , 将二者传给姿态子系统控制器, 然后通过姿态子系统得到的  $u_1$  以及位置子系统得到的  $u_2, u_3, u_4$ , 就可得到位置输出以及姿态输出, 之后就可实现对无人机的控制。

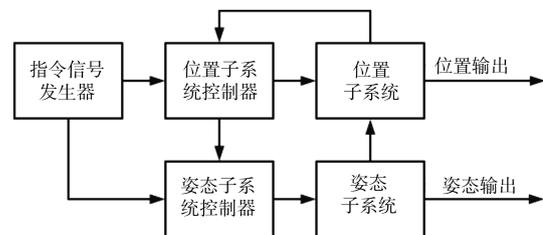


图6 无人机控制结构

Fig.6 UAV control structure

可将无人机的非线性模型划分成两个子系统,分别是位置子系统和姿态子系统

$$\begin{cases} \ddot{\theta} = u_2 - \frac{K_4 l}{I_1} \dot{\theta} \\ \ddot{\psi} = u_3 - \frac{K_5 l}{I_2} \dot{\psi} \\ \ddot{\phi} = u_4 - \frac{K_6 l}{I_3} \dot{\phi} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \ddot{x} = u_{1x} - \frac{K_1}{m} \dot{x} \\ \ddot{y} = u_{1y} - \frac{K_2}{m} \dot{y} \\ \ddot{z} = u_{1z} - g - \frac{K_3}{m} \dot{z} \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$\begin{cases} u_{1x} = u_1 (\cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi) \\ u_{1y} = u_1 (\sin \phi \sin \theta \cos \psi - \cos \phi \sin \psi) \\ u_{1z} = u_1 (\cos \phi \cos \psi) \end{cases} \quad (6)$$

根据无人机的位置子系统(4)以及给定的滑模面给出如下控制律

$$U_1 = -C\dot{E} + \left[ -\frac{K_1 \dot{x}}{m}, -\frac{K_2 \dot{y}}{m}, -\frac{K_3 \dot{z}}{m} \right] + [0, 0, g]^T - MS - L \operatorname{sgn}(s) \quad (7)$$

可使滑模面 $S$ 在有限时间内达到 $0$ 。其中, $C, M, L$ 为可调节的正定矩阵, $U_1 = [u_{1x}, u_{1y}, u_{1z}]^T$ ,位置跟踪误差为 $E$ 。

因三个角度产生的过程和控制率的设计具有相似性,所以以滚转角 $\phi$ 为例,进行姿态控制器设计。

根据无人机的姿态子系统(5)以及给定滑模面<sup>[12]</sup>可得设计控制输入 $u_4$

$$u_4 = c_1 \dot{\phi}_e + \ddot{\phi}_d + \frac{lK_6 \dot{\phi}}{I_3} - d_3 + k_1 s + l_1 \operatorname{sgn}(s) \quad (8)$$

式中, $c_1, k_1, l_1$ 为控制器参数,都为正整数; $d_i (i=1,2,3,4)$ 为观测器的误差。

### 2.3 无人机编队模型

对于无人机编队控制模块,系统采取分布式控制方法进行无人机间的相互通信,使用Leader-Follower方法完成编队控制。考虑一组由 $i$ 个无人机组成的编队,其中 $i = \{L, 1, 2, 3, \dots, N\}$ ,其中 $L$ 为领机Leader, $N$ 为跟随者的数量。该无人机编队的控制目标是实现如图7所示的控制方案,可以使无人机编队在同一高度上飞行。

根据图7,可以得到无人机编队的运动方程为

$$\begin{cases} \dot{X}_i = v_{ix} \cos(\psi_i) - v_{iy} \sin(\psi_i) \\ \dot{Y}_i = v_{ix} \sin(\psi_i) + v_{iy} \cos(\psi_i) \\ \dot{\psi}_i = \omega_i \end{cases} \quad (9)$$

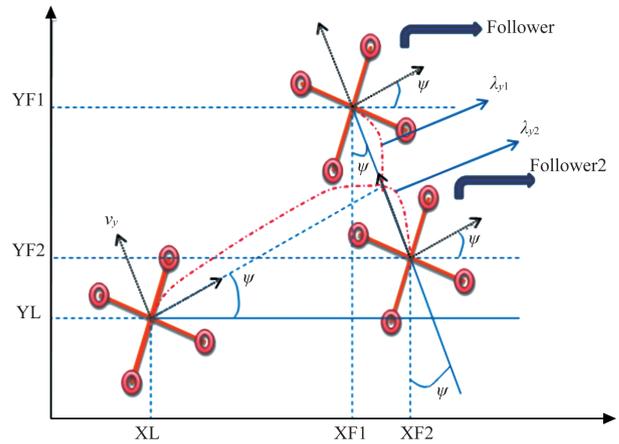


图7 无人机编队在二维平面内的控制示意图

Fig.7 Schematic of the control of a drone formation in a two-dimensional plane

式中, $\omega_i$ 是偏航角的角速度, $v_{ix}, v_{iy}$ 表示无人机速度在 $X, Y$ 方向上的分量。

$\lambda_x, \lambda_y$ 表示从Leader的质心到一个Follower之间在 $X, Y$ 方向上的距离对其进行求导并结合式(9),可以得到

$$\begin{cases} \dot{\lambda}_{xi} = \lambda_{yi} \omega_L - v_{Lx} + v_{Fx} \cos(e_\psi) - v_{Fy} \sin(e_\psi) \\ \dot{\lambda}_{yi} = -\lambda_{xi} \omega_L - v_{Ly} + v_{Fy} \sin(e_\psi) - v_{Fx} \cos(e_\psi) \end{cases} \quad (10)$$

在编队控制算法中应用SMC可以使编队在不确定环境中也可保持编队队形。在 $X, Y$ 方向上定义编队的误差 $e_{xi} = \lambda_{xi}^d - \lambda_{xi}, e_{yi} = \lambda_{yi}^d - \lambda_{yi}$ ,所以无人机在三位坐标 $X, Y$ 方向上的控制误差应满足<sup>[13]</sup>

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} \|e_x\| = \|\lambda_x^d - \lambda_x\| = 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \|e_y\| = \|\lambda_y^d - \lambda_y\| = 0 \end{cases} \quad (11)$$

假设各个无人机之间的距离是保持不变的,即 $\dot{\lambda}_{xi}^d = \dot{\lambda}_{yi}^d = 0$ ,就可得到无人机编队的动态误差方程

$$\dot{x}_i = F_i(x) + G_i(x) \tau_i \quad (12)$$

其中

$$\begin{aligned} x_i &= [e_{xi}, e_{yi}, e_{zi}]^T \\ F_i(x) &= \begin{bmatrix} e_{yi} \omega_L + v_{Lx} - \omega_L \lambda_{yi}^d \\ -e_{xi} \omega_L + v_{Ly} - \omega_L \lambda_{xi}^d \\ -\omega_L \end{bmatrix} \\ G_i(x) &= \begin{bmatrix} -\cos(e_\psi) & \sin(e_\psi) & 0 \\ -\sin(e_\psi) & -\cos(e_\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (13)$$

根据滑模控制理论,为了使滑模收敛为 $0$ ,控制输入 $\tau_i$ 设计如下

$$\tau_i = -G_i^{-1}(x) [F_i(x) + \alpha_i x_i + \beta_i \operatorname{sgn}(\sigma_i)] \quad (14)$$

其中,  $\alpha_i, \beta_i$  为可以调节的正定矩阵。

### 3 试验内容设计

因脑电信号自身十分微弱且容易受到外界因素的干扰, 所以该试验在一个相对幽暗、低辐射、隔声良好、相对安静的封闭试验环境下进行。

试验中的无人机编队使用的是 ROS 开发环境下的 Gazebo 无人机编队仿真, 该仿真模块基于上节的无人机编队控制, 可实现无人机编队的解锁、起飞、降落、左转、右转、三角队形、菱形队形、上锁等控制方法, 刺激界面如图 8 所示。

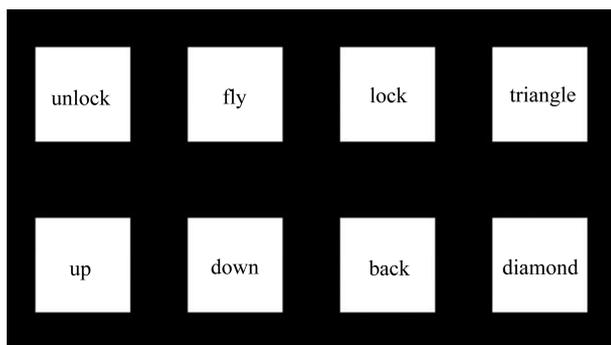


图 8 刺激界面

Fig.8 Stimulate the interface

界面固定频率 8Hz、8.5Hz、9Hz、9.5Hz、10.5Hz、11Hz、11.5Hz、12Hz 不断闪烁来刺激被试者产生脑电信号。8 种刺激频率分别对应控制无人机编队指令: 解锁、起飞、降落、左转、右转、三角队形、菱形队形、上锁。

试验被试人员为 6 人, 刺激目标为 8 个, 试验预估时间 30min, 测试模式识别结果的准确性, 被试者根据提示, 锁定目标方块, 产生 SSVEP 响应, 识别完成后给予被试者反馈结果。

试验过程: 进行试验时被试者放松, 戴好脑电极帽, 视线与电脑屏幕保持水平, SSVEP 模式识别离线试验, 试验有 8 个周期, 每个试验周期里有 16 次刺激, 试验周期内随机遍历两遍 8 个目标, 并给出反馈。一个试验周期的时长为 3min, 试验周期之间的休息时间由被试者决定。被试者根据自己需求与刺激闪烁结果的目标方块完成无人机编队模拟环境下的控制, 即可完成编队控制, 如图 9~图 12 所示。

受试者在不同刺激时长下判别准确率见表 1, 纵坐标为识别时间, 横坐标为试验被试人员的判别准确率。

根据表 1 离线数据结果可以得出, 当判断时间为 3.5s 时



图 9 初始状态

Fig.9 Initial state

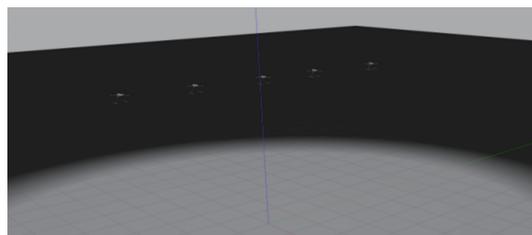


图 10 起飞

Fig.10 Take off



图 11 三角队形

Fig.11 Triangle formation

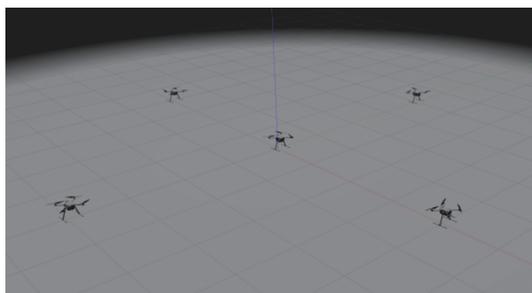


图 12 菱形队形

Fig.12 Diamond formation

判别的准确率最高, 该准确率可以达到较好的控制效果, 满足系统要求。

### 4 结束语

脑机接口技术的提出为人类提供了一种全新的与外界的信息交互形式。在军事、医疗、智能家居和电子游戏等众

表1 离线数据结果  
Table 1 Offline data result

识别时间/s	S1	S2	S3	S4	S5	S6
1.0	0.90	0.48	0.54	0.47	0.8	0.66
1.5	0.97	0.69	0.84	0.62	0.91	0.89
2.0	1.00	0.84	0.85	0.81	0.95	0.92
2.5	1.00	0.91	0.90	0.88	0.97	0.93
3.0	1.00	0.95	0.94	0.90	0.97	0.96
3.5	1.00	0.97	0.95	0.94	0.98	0.98
4.0	0.93	0.97	0.91	0.95	0.98	0.98

多领域都受到广泛的关注。

本文设计了一种基于脑机接口的无人机编队控制系统,该系统通过脑电采集设备,采集被试者注视刺激界面时产生的刺激信号,经过算法服务器解析信号翻译成对应指令,并将指令发送到控制器,还会将结果反馈给刺激界面以验证准确性。

采用非侵入式脑机接口方式对脑电信号进行采集,使用SSVEP算法对采集到的脑电信号进行处理,此方案具有可行性。

AST

## 参考文献

- [1] Bayliss J D. A flexible brain-computer interface[D]. Rochester: University of Rochester, 2001.
- [2] Middendorf M, McMillan G, Calhoun G, et al. Brain-computer interfaces based on the steady-state visual-evoked response[J]. IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering, 2000, 8(2): 211-214.
- [3] Birbaumer N, Ghanayim N, Hinterberger T, et al. A spelling device for the paralysed[J]. Nature, 1999, 398(6725): 297-298.
- [4] Bayliss J D. Use of the evoked potential P3 component for control in a virtual apartment[J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2003, 11(2): 113-116.
- [5] Lalor E C, Kelly S P, Finucane C, et al. Steady-state VEP-based brain-computer interface control in an immersive 3D gaming environment[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2005(19): 1-9.
- [6] 姜延欢,杨永军,李新良,等. 智能无人系统环境感知计量评价研究[J]. 航空科学技术, 2020, 31(12):80-85.  
Jiang Yanhuan, Yang Yongjun, Li Xinliang, et al. Research on environmental perception metrology and evaluation technology of intelligent unmanned system[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(12): 80-85. (in Chinese)
- [7] 吴兆香,欧阳权,王志胜,等. 基于人工智能的无人机区域侦察方法研究现状与发展[J]. 航空科学技术, 2020, 31(10): 57-68.  
Wu Zhaoxiang, Ouyang Quan, Wang Zhisheng, et al. Status and development of regional reconnaissance methods of UAV based on artificial intelligence[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(10): 57-68. (in Chinese)
- [8] 雷艳敏,冯志彬,宋继红. 基于行为的多机器人编队控制的仿真研究[J]. 长春大学学报, 2008(8):40-44.  
Lei Yanmin, Feng Zhibin, Song Jihong. Simulation research on behavior-based multi-robot formation control[J]. Journal of Changchun University, 2008(8):40-44.(in Chinese)
- [9] Hou Zhicheng, Wang Weijun, Zhang Gong, et al. A survey on the formation control of multiple quadrotors[C]//2017 14th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI). IEEE, 2017.
- [10] Bin G, Gao X, Yan Z, et al. An online multi-channel SSVEP-based brain-computer interface using a canonical correlation analysis method[J]. Journal of Neural Engineering, 2009, 6(4): 46002.
- [11] Olfati-Saber R. Nonlinear control of underactuated mechanical systems with application to robotics and aerospace vehicles[D]. Cambridge, Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2001.
- [12] 杨俊鹏,祝小平. 无人机倾斜转弯非线性飞行控制系统设计[J]. 兵工学报, 2009 (11): 1504-1509.  
Yang Junpeng, Zhu Xiaoping. Design of nonlinear flight control system for UAV tilt and turn[J]. Acta Armamentarius, 2009 (11): 1504-1509.(in Chinese)
- [13] 徐德宝. 四旋翼无人机时变编队控制方法的研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2020.  
Xu Debao. Research on time-varying formation control method of quadrotor UAV [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2020.(in Chinese)

## Design of UAV Formation Control System Based on Brain-Computer Interface Data

Li Jiawei, Zhang Hongxin, Xu Ruilin

*Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100088, China*

**Abstract:** With the continuous development of brain-computer interface (BCI) technology, more and more applications based on BCI have been studied and implemented. In order to improve the working efficiency of UAV formation, an 8-target steady state visual evoked potential (SSVEP) brain-computer interface control UAV formation system is designed for the common control commands of UAV formation. The system allows users to flexibly control the formation of UAV through 8 commands of brain-computer interface, adopts canonical correlation analysis (CCA) method to decode EEG, and uses Leader-Follower method to control UAV formation. The experimental results from 6 healthy subjects show that the brain controlled UAV formation system designed in the research has good performance, and the average recognition accuracy is up to 97%, which verifies the feasibility of controlling UAV formation based on non-invasive brain-computer interface technology.

**Key Words:** brain-computer interface; UAV formation; SSVEP; CCA; Leader-Follower

---

**Received:** 2022-10-20; **Revised:** 2022-12-10; **Accepted:** 2023-01-12

**Foundation item:** Aeronautical Science Foundation of China(2019ZG073001); The National Natural Science Foundation of China (62006024); Beijing University of Posts and Telecommunications Foundation, China(2019XD17); Guangdong Provincial Key Areas R&D Program Project(2018B030339001); State Key Development Program for Basic Research of China(2017YFB1002505)