

引用格式: 向华, 刘世良, 陈君, 等. 编码特征点的瞄准线测量方法[J]. 电光与控制, 2019, 26(6): 70-74. XIANG H, LIU S L, CHEN J, et al. Measurement of line of sight based on coded feature points[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(6): 70-74.

编码特征点的瞄准线测量方法

向华, 刘世良, 陈君, 刘延新

(中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471000)

摘要: 针对视觉式头部姿态测量系统存在编码特征点安装空间需求大的问题, 设计一种结构简单、需求空间小的瞄准线测量方法。使用定位摄像机拍摄头盔上的编码特征点图像, 计算机对图像进行解析和计算, 结合正交迭代(OI)算法解算头部姿态。根据编码特征点随意布局特点进行了多组多次的仿真分析, 仿真数据表明此方法是合理、有效的, 利用小空间布局的编码特征点可以解算出高精度瞄准线。

关键词: 头盔显示器; 头部姿态测量; 编码特征点; 正交迭代算法; 瞄准线

中图分类号: O213.2 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-637X.2019.06.014

Measurement of Line of Sight Based on Coded Feature Points

XIANG Hua, LIU Shi-liang, CHEN Jun, LIU Yan-xin

(Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China)

Abstract: In computer vision head pose measurement system, large space is needed for the installation of coded feature points. To solve the problem, a new method is put forward for the measurement of the Line-of-Sight (LOS) with a simple structure as well as smaller installation space. The method uses the positioning cameras to capture the picture of the coded feature points on the helmet, and a computer for image calculating and analyzing. The head pose is obtained finally with the Orthogonal Iterative (OI) algorithm. Based on the characteristic of the feature points, we conducted a series of simulation analysis. The simulation results proved the rationality and the validity of the method, and showed that a high-precision LOS can be obtained by using the coded feature points distributed within a smaller space.

Key words: Helmet-Mounted Display (HMD); head pose measurement; coded feature point; orthogonal iterative algorithm; line of sight

0 引言

在空间有限的飞机座舱内和飞行员头盔上, 分别安装相应的测量设备和部件, 对飞行员目视方向进行测量, 快速获得高精度的瞄准线信息是决定生死的关键因素。国内外比较成熟的瞄准线测量方式有电磁式^[1]、光电式^[2]和视觉式^[3]。与电磁式和光电式相比, 视觉式定位技术具有干扰小、误差小、重量轻、应用环境限制小、运算速度快等优点, 因此被广泛应用。在座舱内安装2~4个摄像机, 在头盔上安装4~8组形状相同的特征点, 通过摄像机拍摄特征点来计算头部姿态^[4-5], 其优点是造价低、测量精度高、抗电磁干扰性强, 缺点是每组特征点所需安装空间大(底边长为80~

100 mm、高度为不小于6 mm的正三棱锥体)。头盔外形尺寸过大、重量偏大、重心偏高, 致使飞行员佩戴头盔的舒适性不好。为解决上述问题, 并提供高精度的瞄准线信息, 提出将编码特征点应用在头盔上进行瞄准线测量的方法。

编码特征点瞄准线测量方法是在头盔上安装3组编码特征点, 根据盔体的结构和外形特点, 只需在盔体上寻找边长为30 mm的正方形区域进行布局, 每组编码特征点由4~8个点组成, 且特征点编码不同; 由安装在座舱内的定位摄像机拍摄头盔上的编码特征点, 然后图像处理计算机对采集的特性点进行图像处理, 从而找出编码特征点在飞机机体坐标系中的对应关系, 最后使用正交迭代算法进行计算, 并转化为飞行员目视目标的瞄准线。

1 方法描述

编码特征点的瞄准线测量系统组成如图1所示。

收稿日期: 2018-05-27

修回日期: 2019-04-08

作者简介: 向华(1975—), 男, 湖南溆浦人, 学士, 高工, 研究方向为头盔瞄准显示技术。

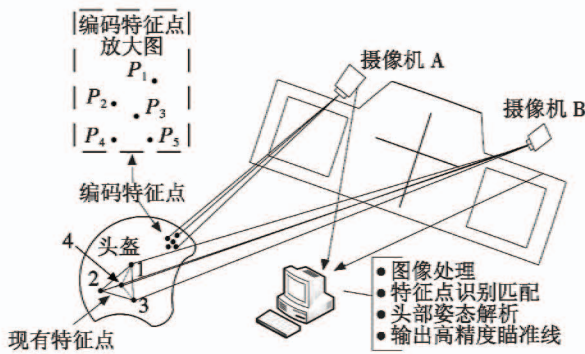


图1 测量系统组成示意图

Fig.1 The composition diagram of the measurement system

由安装在座舱内的定位摄像机 A/B 拍摄头盔上的编码特征点，编码特征点相对于传统等边三角形特征点具有布局空间小且不受限制、识别点易于提取、定位范围大、定位延时小等优点。根据上述特点，假设并模拟编码特征点在头盔上布局，根据头盔外形结构的特点和编码特征点分布情况进行瞄准线测量可行性研究，并仿真分析和计算。

如图1所示，安装在座舱内的定位摄像机 A/B 采集头盔上的编码特征点信息，编码特征点是一种自身带有数字编码信息的标志点，通过相应的算法实现自动匹配识别。信息传输到图像处理计算机，经过特征点识别、特征匹配、特征点坐标提取、特征点图像畸变校正等一系列图像处理计算，获取特征点世界坐标与图像坐标的对应关系，并利用 PNP 算法解算头盔姿态，测量系统流程如图2所示。

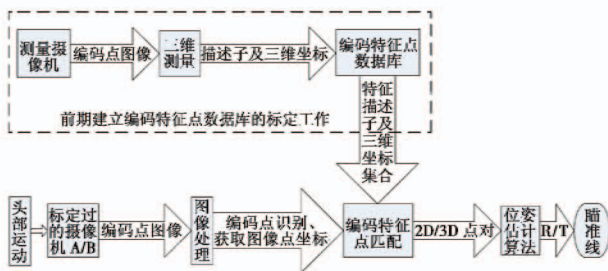


图2 测量系统流程图

Fig.2 The flow chart of measurement system

2 特征点标定测量及应用

2.1 特征点测量

如图3所示，编码特征点由固定点和编码点组成，固定点由 $P_1 \sim P_5$ 组成，编码点在 $M_1 \sim M_8$ 之间任选， P_1, P_3 和 P_5 位于同一条直线上， P_2 和 P_4 关于直线对称分布。

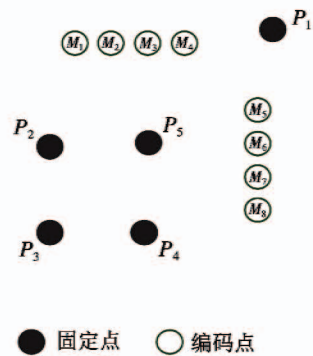


图3 编码特征点组成示意图

Fig.3 The composition diagram of the coded feature points

编码特征点的瞄准线测量步骤如下。

1) 对编码特征点进行标定及三维测量，建立编码特征点数据库(编码特征和编码点三维坐标)。

① 固定点的识别:通过直线公式区分 P_1, P_3, P_5 组点与 P_2, P_4 组点;通过距离远近公式区分 P_1, P_3, P_5 点;顺时针排序即可区分 P_2, P_4 点。

② 编码点的识别:遍历图像中非固定点的所有点,用仿射变换参数将其转化为设计坐标值;计算该设计坐标值与所有设计的编码点的距离,找到最小距离对应的编码点;若该最小距离小于距离阈值,则认为找到一个编码点。

2) 利用定位摄像机获取的编码特征点与数据库中的编码特征点进行匹配。

3) 把匹配成功的编码特征点的 n 对二维图像坐标点——三维目标坐标点对代入姿态估计算法^[6-7],估计编码特征点位姿参数 H 和 S ,并解析出对应的姿态角。

图4所示为编码特征点的投影图。

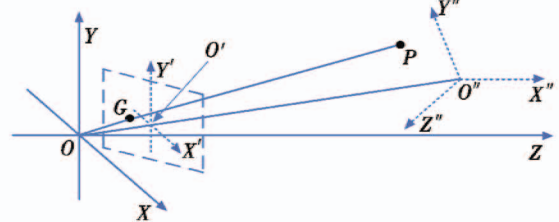


图4 编码特征点的投影图

Fig.4 The projection diagram of the coded feature points

如图4所示，令 P_i 作为头盔编码特征点在头盔基准坐标系 $O''X''Y''Z''$ 中的三维欧氏坐标点集， C_i 作为头盔编码特征点在定位摄像机基准坐标系 $OXYZ$ 中相对应的三维欧氏坐标点集，头盔编码特征点在图像坐标系 OXY 中的二维图像坐标点集为 G_i 。利用 PNP 算法解算姿态^[8-9]可以获取 n 组二维图像坐标 G_i 及三

维坐标 P_i 点对。2D/3D 点对的投影成像关系为

$$Z_i G_i = K(H P_i + S) \quad (1)$$

式中: Z_i 表示在定位摄像机坐标系中头盔编码特征点的深度值; K 为定位摄像机内参数。在编码结构特征点数据库已建立和定位摄像机已完成内参数标定的前提下, 以编码特征点在图像中的二维坐标以及在飞机坐标系中的三维坐标的约束关系为条件, 根据式(1)估计编码特征点的旋转矩阵 H 和平移向量 S , 最后计算出飞行员头盔瞄准线。

2.2 特征点运动轨迹算法

飞行员转动头部瞄准目标时, 编码特征点随头部一起运动, 通过采集编码特征点运动轨迹就可以计算出瞄准线。

飞行员头部运动轨迹估计是指在编码特征点完成标定和定位摄像机内参数 K 已知的情况下, 应用 n 个三维目标编码特征点及其二维图像坐标点来估计编码特征点的旋转矩阵 H 和平移向量 S , 通过求解 PNP 问题实现头部运动轨迹的跟踪和定位。求解 PNP 问题的算法主要分为线性和非线性算法, 线性算法^[10-11]有忽略旋转矩阵正交性的 DLT 算法和利用虚拟控制点的 EPNP 算法, 这两种算法的计算速度很快, 但是计算精度相对较低, 且抗噪声干扰能力差; 非线性迭代算法有最大似然估计算法(LM 算法)^[12]和 LU^[13]等在 1998 年提出的具有全局收敛性的正交迭代算法(OI 算法), 但是 LM 算法相对 OI 算法的工作量太大, 很难应用在工程中。OI 算法以目标空间共线性误差为目标函数, 利用最小二乘原理进行迭代优化来获取最优解。此算法的特点是计算速度快、实时性好, 抗噪能力强, 解算精度非常高。通过正交迭代算法对编码特征点运动轨迹进行解算, 在归一化图像平面中将二维图像点集 G_i 进行转换计算, 其齐次坐标点集为 $\{G_i = (u_i, v_i, 1)^T \mid i = 1, 2, \dots, n\}$ 。三维点对 $\{(C_i, P_i) \mid i = 1, 2, \dots, n\}$ 的变换关系公式为 $C_i = H P_i + S$ 。沿着向量 G_i 视线的投影矩阵设为 B_i , 其表达式为 $B_i = G_i G_i^T / G_i^T G_i$ 。通过转换, 目标空间中的共线性方程可表述为 $C_i' = B_i C_i \approx C_i$, C_i' 为 C_i 在定位摄像机基准坐标系利用 B_i 转换的正交投影, 得出关于 H 和 S 的目标空间共线性误差方程为

$$E(H, S) = \min_{H, S} \sum_{i=1}^n \|(I - B_i)(H P_i + S)\|^2 \quad (2)$$

H 和 S 的求解过程如下。

1) 赋给旋转矩阵 H^{*k} 初始值, 利用式(2)求解 S^{*k} 与 H^{*k} 关系为

$$S^{*k}(H^{*k}) = \frac{1}{n} \left(I - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n B_i \right)^{-1} \sum_{j=1}^n (B_j - I) H^{*k} P_j \quad (3)$$

2) 求解最优化的 $H^{*(k+1)}$ 时, 要先获得 S^{*k} , 并采用旋转矩阵 H 正交性和行列式为 1 作为约束调节进行奇异值分解法(SVD)计算。

定义

$$\begin{cases} P_i'' = P_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \\ C_i'' = C_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i \\ Q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i'' P_i''^T \\ U D V^T = Q \end{cases} \quad (4)$$

式中, (U, D, V) 是对 Q 的奇异值分解。则有

$$H^{*(k+1)} = V U^T \quad (5)$$

如果 $\sum_{i=1}^n \|C_{i+1} - C_i\|^2$ 计算结果大于预设的阈值, 则重复步骤 1) 和 2), 从而获得旋转矩阵 H 和平移向量 S 的最优值。飞行员目视寻找目标时, 编码特征点是随头部一起进行随机运动, 头部相对于机体坐标系的三维空间姿态即为瞄准线。假定 α, θ 和 β 分别代表瞄准线的方位角、俯仰角、横滚角。假设旋转矩阵 H 为

$$H = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \quad (6)$$

则瞄准线为

$$\begin{cases} \alpha = \arctan(a_{12}/a_{11}) \\ \theta = \arcsin(-a_{13}) \\ \beta = \arctan(a_{23}/a_{33}) \end{cases} \quad (7)$$

3 仿真及分析

在建立模拟仿真模型时, 头盔编码特征点和定位摄像机都已完成标定。假设头盔编码特征点 P_i 在头盔基准坐标系中的分布为图 1 中 3 组不同的 $P_1 \sim P_5$ 。头部在 X, Y, Z 3 个方向可平移加旋转, 头部平移范围: X 方向为 $-100 \sim +300$ mm, Y 方向为 $-200 \sim +200$ mm, Z 方向为 $-100 \sim +100$ mm。头部在上述范围内运动时, 方位角和俯仰角在 $[-90^\circ, 90^\circ]$ 范围内随机旋转, 横滚角在 $[-45^\circ, 45^\circ]$ 范围内随机旋转。

3.1 测量误差对姿态角的影响

进行仿真实验的目的是测试定位摄像机拍摄头盔编码特征点在头盔坐标系中的测量误差对头部姿态角误差的影响。在仿真实验中, 在头盔基准坐标系中三维编码特征点添加均值为 0、均方差值在 $0.1 \sim 2$ mm 范围内以 0.1 mm 步长进行递增的随机高斯噪声。旋转矩阵和平移向量随机给出, 图像噪声设定成均值为 0、标准差为 0.5 像素的高斯噪声, 每个步长进行 1000

次随机实验。

仿真计算结果如图5所示。

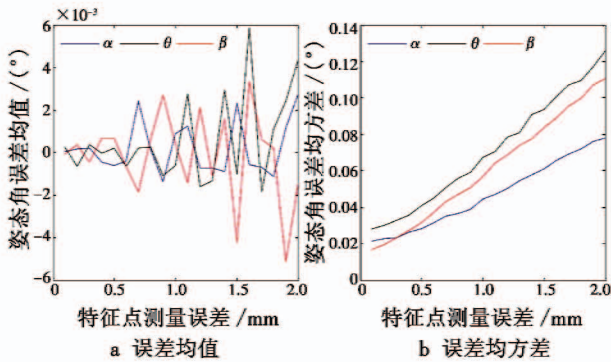


图5 测量误差引起的姿态角误差

Fig. 5 The error of attitude caused by measurement error

由图5可知,头部姿态角误差的均方差值、误差均振荡变化随着编码特征点测量误差增大而增大。因此,在实际应用中,通过减小编码特征点测量误差的方法,可以实现头部运动姿态角测量精度的提高。

3.2 特征点噪声对姿态角的影响

在定位摄像机提取头盔编码特征点图像过程中,会有随机误差引入,仿真实验需要测出图像噪声对头部姿态角误差的影响。在仿真实验中,将图像噪声均值设定为0,在0.1~2.0像素范围内标准差值以0.1像素递增,旋转矩阵和平移向量仍然是随机给出,其均值设定为0,标准差值设定为0.1 mm,每个步长进行1000次随机实验。

根据仿真实验统计数据得出结果如图6所示。

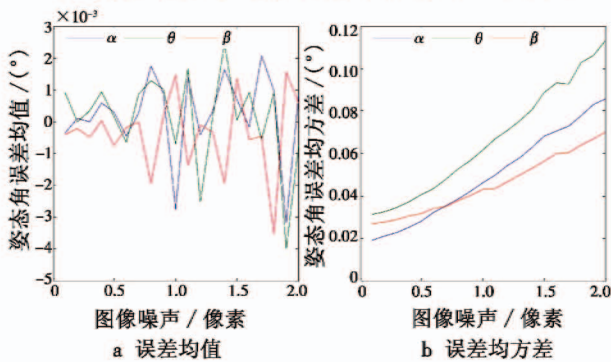


图6 图像噪声对姿态角测量的影响

Fig. 6 The effect of image noise on attitude measurement

由图6可知,随着图像噪声值的增加,头部姿态角误差的均方差值也不断变大,其均值在零值附近区域小幅振荡。可归纳得出,随着图像噪声值递增,头部姿态角误差值振荡变化越来越剧烈。因此,在实际应用中,通过提高编码结构特征点坐标中心提取精度的方法,来保证头部运动姿态角测量精度的提高。

3.3 测量精度综合仿真结果

在仿真实验中共计进行5000次头盔编码特征点

随机测量实验。头部运动姿态的方位角和俯仰角在 $[-90^\circ, 90^\circ]$ 范围内随机变化,横滚角在 $[-45^\circ, 45^\circ]$ 范围内随机变化。头部运动的平移向量在下述范围内随机变化: X 方向为 $-100 \sim +300$ mm, Y 方向为 $-200 \sim +200$ mm, Z 方向为 $-100 \sim +100$ mm。将图像噪声设定成均值为0、标准差为0.5像素的高斯噪声。将编码特征点测量误差设定成均值为0、标准差为0.2 mm的高斯噪声。将影响瞄准线测量精度的多个影响因子同时注入,综合仿真分析结果如图7所示。

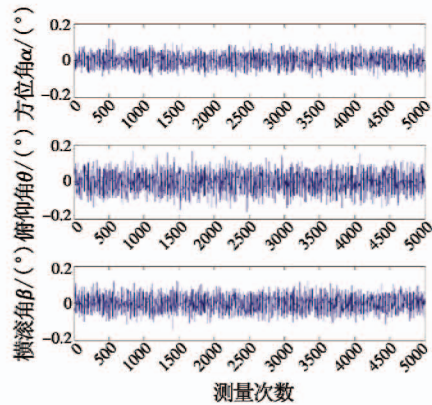


图7 头部运动姿态角误差仿真分析图

Fig. 7 The simulation analysis diagram of head motion attitude error

对头盔编码特征点姿态角变化、平移向量变化、测量误差、图像噪声等影响瞄准线测量精度的因子进行综合仿真实验,从图7的头部运动姿态角误差仿真分析数据可以看出,本文方法测量的头部3个姿态角误差范围都在 0.2° 以内,瞄准线精度较高。

4 结论

编码特征点的瞄准线测量方法是使用定位摄像机拍摄头盔上编码特征点图像信息,应用图像处理算法配合正交迭代算法获取头部运动姿态,并结合具有代表性的仿真数据,计算出较高精度的瞄准线。本文提出了一个全新的瞄准线测量方案,可以大大改善传统视觉定位方法特征点识别困难和布局空间需求大的现状。在模拟真实座舱空间环境下进行的实物仿真实验可为瞄准线测量的实际应用和研究提供方法参考。

参考文献

[1] 王永生. 机载头盔瞄准显示系统动态性能研究[J]. 电光与控制, 2013, 20(8): 1-5.

[2] 张求知, 刘建业, 王立伟. 电磁式跟踪器磁场畸变的姿态校正技术[J]. 南京航空航天大学学报, 2007, 39(6): 711-715.

[3] 刘世良, 丁全心, 张劲锋. 基于座舱结构特征的瞄准线测量方法研究[J]. 电光与控制, 2016, 23(1): 85-88.

- [4] MURPHY-CHUTORIAN E, TRIVEDI M M. Head pose estimation in computer vision: a survey[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2009, 31(4):607-626.
- [5] 王超,魏生民,周继红,等. 视频图像技术在头部位置跟踪上的应用研究[J]. 现代制造工程,2008(2):111-115.
- [6] 周维,许海霞. 一种摄像机姿态估计方法[J]. 系统仿真学报,2011, 23(12):2582-2587.
- [7] 李书杰,刘晓平. 摄像机位姿的高精度快速求解[J]. 中国图象图形学报,2014, 19(1):20-27.
- [8] 杨森,吴福朝. 摄像机位姿的加权线性算法[J]. 软件学报,2011, 22(10):2476-2487.
- [9] 岳晓奎,武媛媛,吴侃之. 基于视觉信息的航天器位姿估计迭代算法[J]. 西北工业大学学报,2011, 29(4):559-563.
- [10] 郭军,董新民,王龙. 综合重构与正交迭代位姿估计算法[J]. 应用科学学报,2011, 29(6):577-584.
- [11] ABDEL-AZIZ Y I, KARARA H M, HAUCK M. Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2015, 81(2):103-107.
- [12] LEPETIT V, MORENO-NOGUER F, FUA P. EPnP: an accurate $O(n)$ solution to the PnP problem[J]. International Journal of Computer Vision, 2009, 81(2):155-166.
- [13] LU C P, HAGER G D, MJOLSNES E. Fast and globally convergent pose estimation from video images[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(6):610-622.

(上接第 33 页)

- [11] 刘红光,顾彬彬,邱峰,等. 7.50R20 14PR PW02 型轮胎侧偏刚度的试验与拟合[J]. 拖拉机与农用运输车,2009, 36(5):63-65.
- [12] 隋福成,陆华. 飞机起落架缓冲器数学模型研究[J]. 飞机设计,2001, 6(2):44-51.
- [13] 吴森堂,费玉华. 飞行控制系统[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2005.
- [14] 空军第八研究所,航空工业部六三〇所. GJB185-86 有人驾驶飞机(固定翼)飞行品质[S]. 北京:总装备部军标出版发行部,1986.

(上接第 69 页)

- [7] 赵元伟,卢京朝. 四旋翼飞行器的建模及基于反步法的控制[J]. 科学技术与工程,2013, 13(34):10425-10430.
- [8] 周克良,李德福,聂丛楠,等. 基于可变论域模糊 PID 的汽车烘房温控系统[J]. 江西理工大学学报,2017, 38(3):68-74.
- [9] JIA Z Y, YU J Q, MEI Y S, et al. Integral backstepping sliding mode control for quadrotor helicopter under external uncertain disturbances[J]. Aerospace Science and Technology, 2017, 68:299-307.
- [10] YOUNES Y A, DRAK A, NOURA H, et al. Quadrotor position control using cascaded adaptive integral backstepping controllers[C]//Applied Mechanics & Materials, 2014:98-106.
- [11] 甄红涛,齐晓慧,夏明旗,等. 四旋翼无人机块控反步姿态控制器设计[J]. 电光与控制,2013, 20(10):87-91.
- [12] 王大伟,高席丰. 四旋翼无人机滑模轨迹跟踪控制器设计[J]. 电光与控制,2016, 23(7):55-58.
- [13] MNASRI C, GASMI M. LMI-based adaptive fuzzy integral sliding mode control of mismatched uncertain systems[J]. International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, 2011, 21(4):605-615.
- [14] 侯明冬,刘金琨,田杰. 欠驱动四旋翼飞行器全局轨迹跟踪滑模控制[J]. 控制工程,2016, 23(6):928-932.
- [15] 窦立谦,芦飞. 基于 ESO 和反步法的四旋翼飞行器轨迹跟踪控制[J]. 天津大学学报:自然科学与工程技术版,2017, 50(5):500-506.
- [16] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用[J]. 控制与决策, 1998, 13(1):19-23.
- [17] 王俊生,马宏绪,蔡文澜,等. 基于 ADRC 的小型四旋翼无人机直升机控制方法研究[J]. 弹箭与制导学报, 2008, 28(3):31-34.
- [18] 刘一莎,杨晟萱,王伟. 四旋翼飞行器的自抗扰飞行控制方法[J]. 控制理论与应用,2015, 32(10):1-10.
- [19] 杨立本,章卫国,黄得刚. 基于 ADRC 姿态解耦的四旋翼飞行器鲁棒轨迹跟踪[J]. 北京航空航天大学学报,2015, 41(6):1026-1033.
- [20] SALAZAR-CRUZ S, ESCARENO J, LARA D, et al. Embedded control system for a four-rotor UAV[J]. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 2007, 21(2/3):189-204.
- [21] 邵立伟,廖晓钟,夏元清,等. 三阶离散扩张状态观测器的稳定性分析及其综合[J]. 信息与控制,2008, 37(2):135-139.