

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1802317

基于多维谱峰联合搜索的无人机控制抗扰动算法*

刘 伟

(广州番禺职业技术学院 广州 511483)

摘要: 无人机飞行中受到大气小扰动影响容易导致飞行失稳,为了提高飞行稳定性,提出一种基于多维谱峰联合加权搜索的无人机控制抗扰动算法。在速度坐标系、体坐标系、弹道坐标系三维坐标系中构建无人机飞行的空间动力学模型,采用分布源建模方法进行无人机飞行的波束指向性特征分析,利用波束域方向的加权系数控制无人机的稳态跟踪误差,结合波束主瓣宽度进行飞行小扰动抑制,采用多维谱峰联合加权搜索方法实现对无人机飞行控制参量的联合估计,根据参量估计结果进行误差反馈和扰动抑制,提高飞行稳定控制性能。仿真结果表明,采用该方法进行无人机控制的抗扰动性较好,对飞行控制参量的联合估计准确性较高,输出稳定性较好。

关键词: 无人机;飞行控制;扰动;抑制;空间波束形成

中图分类号: TP273;TN972 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.60

Anti-disturbance algorithm for UAV control based on multi-dimensional spectral peak joint search

Liu Wei

(Guangzhou Panyu Polytechnic, Guangzhou 511483, China)

Abstract: In order to improve the flight stability, an anti-disturbance control algorithm for UAV based on multi-dimensional spectral peak combined weighted search is proposed. The spatial dynamics model of UAV flight is constructed in the velocity coordinate system, the body coordinate system and the ballistic coordinate system. The distributed source modeling method is used to analyze the beam directivity characteristics of UAV flight. The steady-state tracking error of UAV is controlled by the weighting coefficient of beamspace direction, and the small disturbance suppression is carried out by combining the width of the main lobe of the beam, and the joint estimation of UAV flight control parameters is realized by using the multi-dimensional spectral peak joint weighted search method. Error feedback and disturbance suppression are carried out according to parameter estimation results to improve flight stability control performance. The simulation results show that the proposed method has better anti-disturbance performance, higher accuracy of joint estimation of flight control parameters and better output stability.

Keywords: UAV; flight control; disturbance; suppression; space beamforming

0 引 言

随着无人机技术的快速发展,无人机飞行的稳定性和导航精度越来越高,带载能力越来越强,无人机将成为未来空间飞行器的主要品种,在执行未来的军事行动和其它民用任务方面发挥越来越重要的作用。无人机的设计中,控制系统设计是无人机系统的核心,无人机的飞行控制包括导航控制、飞行动力学控制、飞行的抗扰动控制的参数输出控制等各个方面,结合无人机的专门控制装置,根据动力装置、机载导航装置进行飞行控制系统的优化设计,提高无人

机的自动价值和飞行荷载的稳性,研究无人机的飞行控制方法具有重要的现实意义^[1]。

无人机的低空飞行中,容易受到气流扰动的影响,导致空间飞行的抗扰动能力不好。为了提高无人机飞行的稳定性,进行抗扰动控制设计,结合方位、距离、速度、高度等信息的联合估计^[2],提高无人机的飞行参数的自适应估算和输出指令优化调度匹配能力。传统方法中,对无人机控制抗扰动方法主要有自适应反演控制、模糊控制、积分控制方法、传感信息融合跟踪识别方法等^[3],设计无人机的低空抗气流扰动的鲁棒性控制约束参量模型,结合模糊控制方法,

收稿日期:2018-11-22

* 基金项目:广州番禺职业技术学院“十三五”(第二批)科研项目(2018KJ011)资助

实现无人机的飞行弹道优化,提高无人机的飞行稳定控制能力。文献[4]提出一种基于自适应动态反馈跟踪和参量融合的无人机低空抗气流扰动的全弹道俯仰跟踪控制算法,以俯仰角、转向角、加速度等参数为控制约束参量,进行全弹道的跟踪控制的自适应学习训练,建立低空抗气流扰动的动态逆反馈参量调节模型,提高飞行控制的稳定性,但该方法容易受到不确定扰动气流的影响,导致控制输出的平稳性不好。文献[5]提出一种基于飞行控制变量的全弹道镇定性处理的无人机控制抗扰动算法,构建无人机的反拦截的等效数学模型,采用自适应动态反馈跟踪方法进行无人机抗扰动控制处理,提高飞行稳定性和抗气流干扰能力,但该方法存在比较大的扰动时,容易产生稳态误差。

针对上述问题,本文提出一种基于多维谱峰联合加权搜索的无人机控制抗扰动算法。首先建立无人机的纵向运动模型和空间动力学模型,采用分布源建模方法进行无人机飞行的波束指向性特征分析,利用波束域方向的加权系数控制无人机的稳态跟踪误差,结合波束主瓣宽度进行飞行小扰动抑制,然后采用多维谱峰联合加权搜索方法实现对无人机飞行控制参量的联合估计,根据参量估计结果进行误差反馈和扰动抑制,提高飞行稳定控制性能。最后进行仿真实验分析,展示了本文方法在提高无人机控制中抗小扰动能力方面的优越性能。

1 无人机飞行动力学模型和分布源建模

1.1 无人机飞行动力学模型

为了实现对无人机飞行控制的优化,首先采用分布式传感量化融合跟踪方法进行无人机飞行动力学参数采集,构建无人机飞行参数采集的空间波束域模型,假定无人机飞行参数采集的分布式目标信号源为一个多径输入的信号源模型,将传感量化融合的阵元域接收数据转换至波束域,采用多个参数联合估计方法,进行无人机飞行参数的自适应估计,结合联合参量识别方法,降低阵元域复杂的计算量,若无人机飞行参数采集的阵元数目为 M ,假设无人机在空间坐标系中为一个空间的点目标^[6],飞行参量的传感信息通过波束形成方法聚焦在 L 个波束中,其中 $L \subset M$,则无人机飞行动力学参数估计的波束转换矩阵 $T(n)_{(N \times L)}$ 可以表示为:

$$T(n) = w[v(1), v(2), \dots, v(L)] \quad (1)$$

其中无人机飞行控制器的扰动量为:

$$v(i) = [1, e^{j2\pi d \sin(\theta(i))/\lambda}, e^{j2\pi 2d \sin(\theta(i))/\lambda}, \dots, e^{j2\pi(M-1)d \sin(\theta(i))/\lambda}]^T \quad (2)$$

式中: d 为阵元间隔; λ 指无人机的飞行控制系统输出波束的波长; $\theta(i)$ 为第 i 个波束所指向的方向; w 为阵列接收信号的协方差矩阵,用来控制无人机输出控制指令的波束主瓣宽度以及旁瓣高度^[7]。在信号子空间中, L 个波束形成无人机的飞行扰动波束域,波束空间的转换过程可以表示为:

$$y(t) = T^H(n)x(t) \quad (3)$$

接收端接收无人机的协方差矩阵的信号子空间中经过转换之后的阵列输出向量变为波束空间向量,在纵向飞行空间存在少量的扰动目标时,采用特征降维方法,将飞行控制的波束域维数由 N 减少为 L ,这样也就减少了位姿不确定扰动的影响,构建无人机飞行扰动的约束动力学矢量为 $y(t)$,求取相关矩阵可得:

$$R_B(n) = E\{y(t)y^H(t)\} = T^H(n)E\{x(t)x^H(t)\}T(n) = T^H(n)RT(n) \quad (4)$$

在阵元域阵列中构建飞行控制约束参量的小扰动矩阵可以表示为:

$$R = E(x_i x_i^H) = B P_i B^H + \sigma_n^2 I_M \quad (5)$$

其中 $B = [b_1, b_2, \dots, b_q]$,表示无人机在纵向运动、侧向运动的联合控制特征分量,其特征分解式为:

$$R = U \Lambda_s U_s^H + U_n \Lambda_n U_n^H \quad (6)$$

假设不同的分布式气流阵列下,采用速度矢量的投影控制方法,得到无人机飞行动力学的状态分布矩阵满足 $U_n^H b_i = 0$,与阵元域对应,借助波束转换矩阵,构建无人机飞行动力学的空间约束方程为:

$$y(t) = T^H(n)x(t) \quad (7)$$

设计自适应律,以无人机的使俯仰角跟踪误差为控制变量,进行无人机飞行动力学模型的优化设计。

1.2 无人机飞行的波束指向性特征分析

采用分布源建模方法进行无人机飞行的波束指向性特征分析^[8],得到传感信息分布波束域接收数据的相关矩阵为:

$$R_B(n) = E\{y(t)y^H(t)\} = T^H(n)E\{x(t)x^H(t)\}T(n) = T^H(n)RT(n) \quad (8)$$

为获得期望的稳定特性,对无人机飞行的波束指向性矩阵进行特征分解,表示式为:

$$R_B = U_{sB} \Lambda_{sB} U_{sB}^H + U_{nB} \Lambda_{nB} U_{nB}^H \quad (9)$$

其中 $T(n)$ 指的是波束转换矩阵,对于分布式飞行控制传感阵列,在模型参数不确定情况的影响下,在采用姿态传感器进行飞行位姿测量,得到第 i 个分布式目标的波束域方向矢量 $b_{iB}(\theta_i) = T^H b_i(\theta_i)$,在标准弹道方程下,利用波束域方向矢量 b_{iB} 的一阶近似 $b_{iB}(\theta_i, \zeta_i)$,将无人机的飞行抗扰动控制问题转换为极小化寻优问题,得到优化解:

$$(\theta_i, \zeta_i) = \arg \min_{(\theta, \zeta)} b_{iB}^H(\theta, \zeta) \bar{U}_{nB} \bar{U}_{nB}^H b_{iB}(\theta, \zeta) \quad (10)$$

其中 \bar{U}_{nB} 为波束域的二维谱峰搜索的目标矢量。将 $b_{iB}(\theta_i, \zeta_i) = \Psi(\theta_i) \zeta_i$ 代入式(10),有:

$$(\theta_i, \zeta_i) = \arg \min_{(\theta, \zeta)} \zeta^H Q(\theta) \zeta \quad (11)$$

对无人机飞行动力学方程和弹道模型进行联合跟踪识别,采用误差反馈控制方法^[9],得到飞行控制扰动项的 $L \times L$ 阶矩阵 $Q(\theta)$ 为 $Q(\theta) = \Psi^H(\theta) \bar{U}_{nB} \bar{U}_{nB}^H \Psi(\theta)$,由于 $\zeta_i(0) = 1$,在分布式目标波束方向内,采用 DOA 估计方法,得到无人机飞行的波束指向性特征的提取问题近似为如下约束极

小化问题的解: $(\theta_i, \zeta_i) = \arg \min_{(\theta, \zeta), \zeta(0)=1} \zeta^H Q(\theta) \zeta$, 飞行稳定的约束条件 $\zeta_i(0) = 1$ 可以等效为 $\zeta^T \omega = 1$, 其中二阶矢量 ω 可以定义为 $\omega = [1 \ 0]^T$, 根据上述分析, 在速度坐标系、体坐标系、弹道坐标系三维坐标系中构建无人机飞行的空间动力学模型, 结合空间三维联合飞行参数估计方法, 进行无人机控制的抗扰动设计。

2 控制算法优化

2.1 波束域加权控制律

在采用分布源建模方法进行无人机飞行的波束指向性特征分析的基础上, 进行无人机飞行的抗扰动控制律优化设计, 本文提出一种基于多维谱峰联合加权搜索的无人机控制抗扰动算法, 假设远场存在 q 个无人机飞行惯性参量的传感信息采集分布源, 采集的无人机飞行状态信号矢量 $s(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_q(t)]^T$ 和噪声矢量 $n(t)$ 是相互独立的零均值随机矢量, 计算一次 L 阶矩阵的广义逆, 得到无人机的分布阵列的飞行姿态特征向量可以表示为:

$$x(t) = \sum_{i=1}^q s_i(t) \mathbf{b}_i(\theta_i) + \mathbf{n}(t) \quad (12)$$

其中 $\mathbf{b}_i(\theta_i)$ 指义的阵列流型特征向量, 计算一次 L 阶矩阵的广义逆, 得到无人机的分布阵列的飞行姿态特征向量可以表示为:

$$x(t) = \sum_{i=1}^q s_i(t) \mathbf{b}_i(\theta_i) + \mathbf{n}(t) \quad (13)$$

其中 $\mathbf{b}_i(\theta_i)$ 指的是广义的阵列流型向量, 根据求解有约束条件下的极值问题的方法^[10], 上述约束极小化问题的拉格朗日代价函数为:

$$L(\theta, \zeta) = \zeta^T Q(\theta) \zeta + 2\beta(1 - \zeta^T \omega) \quad (14)$$

其中 β 为拉格朗日系数, 在固定无人机的飞行姿态角 θ 的条件下, 将上式对矢量 ζ 求导, 并令之为 0, 得 $\zeta = \beta Q^{-1}(\theta) \omega$, 采用多维谱峰联合加权搜索方法实现对无人机飞行控制参量的联合估计^[11], 得到参数估计的协方差矩阵可以表示为:

$$\mathbf{R} = E[x_i x_i^H] = \mathbf{B} \mathbf{P} \mathbf{B}^H + \sigma_n^2 \mathbf{I}_M \quad (15)$$

其中 $\mathbf{B} = [\mathbf{b}_1(\theta_1), \mathbf{b}_2(\theta_2), \dots, \mathbf{b}_q(\theta_q)]^T$, 协方差矩阵的奇异值分解为:

$$\mathbf{R} = \mathbf{U}_s \mathbf{\Lambda}_s \mathbf{U}_s^H + \mathbf{U}_n \mathbf{\Lambda}_n \mathbf{U}_n^H \quad (16)$$

其中矩阵 \mathbf{U}_s 和 \mathbf{U}_n 的表示飞行惯性矩的列矢量, 分别由奇异值 $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_q$ 和 σ_n^2 对应的奇异矢量构成。采用波束域加权控制方法^[12], 进行飞行位姿参量的旁瓣波束抑制, 提高飞行控制的抗扰动性。

2.2 飞行参数误差反馈和扰动抑制

结合波束主瓣宽度进行飞行小扰动抑制, 采用多维谱峰联合加权搜索方法^[13], 得到无人机飞行扰动分量的二阶原点矩为:

$$E[s(t)s(k)^H] = \mathbf{P}_s \delta(t, k), E[\mathbf{n}(t)\mathbf{n}(k)^H] = \sigma_n^2 \mathbf{I}_M \delta(t, k) \quad (17)$$

其中 $\delta(t, k)$ 为 kronnecker δ 函数, \mathbf{P}_s 为标准弹道下的无人机飞行控制输出协方差矩阵, \mathbf{I}_M 为 M 阶单位矩阵, σ_n^2 为小扰动方差。对无人机飞行控制参量进行联合估计^[14], 在飞行的平衡状态下, 得到飞行小扰动分量 $x(t)$ 的协方差矩阵:

$$\mathbf{R}_x = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_x(1,1), \mathbf{R}_x(1,2), \dots, \mathbf{R}_x(1,M) \\ \mathbf{R}_x(2,1), \mathbf{R}_x(2,2), \dots, \mathbf{R}_x(2,M) \\ \vdots \\ \mathbf{R}_x(M,1), \mathbf{R}_x(M,2), \dots, \mathbf{R}_x(M,M) \end{bmatrix} \quad (18)$$

采用多维谱峰联合搜索方法, 进行最优参数估计, 构造多维谱峰联合估计矩阵 \mathbf{R}_T :

$$\mathbf{R}_T = \begin{bmatrix} r(1), r^*(2), \dots, r^*(M) \\ r(2), r(1), \dots, r^*(M-1) \\ \vdots \\ r(M), r(M-1), \dots, r(1) \end{bmatrix} \quad (19)$$

其中:

$$r(i) = \frac{1}{M-i+1} \sum_{m=1}^M \mathbf{R}_x(m, m-i+1), i = 1, \dots, M \quad (20)$$

根据上述控制, 对于噪声子空间中的小扰动气流采用空间波束加权控制方法, 进行扰动抑制, 实现对飞行控制参量的联合估计^[15], 根据参量估计结果进行误差反馈和扰动抑制, 提高飞行稳定控制性能。

3 仿真试验分析

为了验证本文方法在实现无人机飞行扰动控制中的性能, 进行仿真实验。实验采用 MATLAB 7 仿真软件设计, 对无人机的飞行姿态参数采集的敏感元件为磁力计和陀螺仪, 数据采集的总线为 PXI-6713 为 8 通道模拟输出模块, 控制信号模拟预处理机动态范围为 $-40 \sim +40$ dB, 控制输出的放大量为 80 dB, 数据采集的传感器由 32 个阵元组成的均匀线列阵, 相邻阵元间隔为 0.24, 气流的扰动信噪比为 10, 无人机的分布信源扩展分别为 $\Delta_1 = 1^\circ, \Delta_2 = 2^\circ$, 快拍数为 1000。根据上述仿真环境参数设定, 进行仿真实验, 测得无人机飞行的波束指向性分布的 DOA 估计结果如图 1 所示。

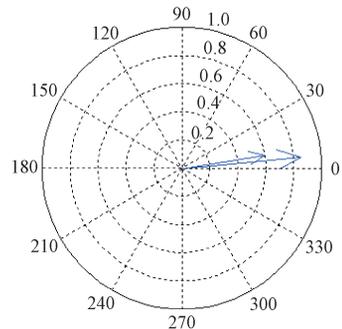


图 1 无人机飞行的波束指向性分布的 DOA 估计

利用波束域方向的加权系数控制无人机的稳态跟踪误差,得到估计误差随气流扰动信噪比 SNR 的变化曲线如图 2 所示。

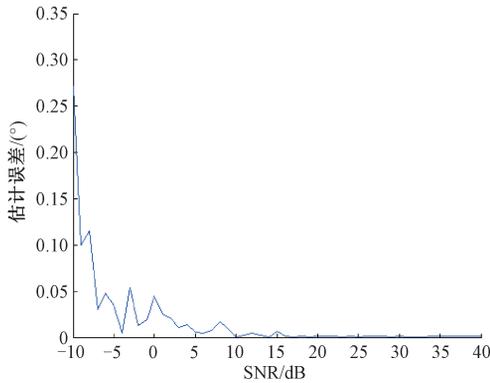


图 2 无人机的飞行参数估计误差

分析图 2 得知,采用本文方法进行无人机的飞行参数估计的误差较低,在 $SNR=18$ dB 时,输出误差为 0,在此基础上,采用多维谱峰联合加权搜索方法实现对无人机飞行控制参量的联合估计,得到采用本文方法和传统方法进行飞行扰动控制的谱峰搜索结果,如图 3 所示。

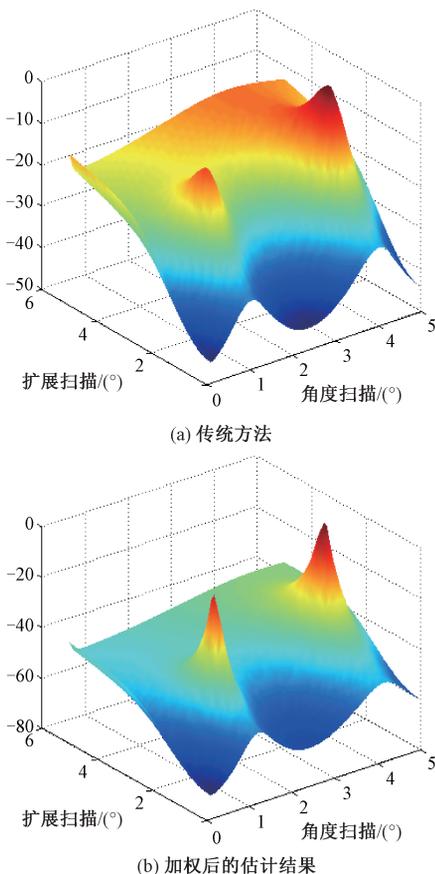


图 3 飞行扰动控制的谱峰搜索结果

分析图 3 可知,采用本文方法进行无人机飞行多维谱峰搜索加权控制,提高了无人机飞行的抗扰动能力,谱峰的波束形成性较好,控制稳定性得到提升。测试不同方法进行无人机控制后的姿态参量调节结果,以无人机的横滚角、俯仰角、航向角为测试参数,得到数据测试输出如表 1 所示。

表 1 姿态参量解算误差结果统计

参数	本文方法	Kalman 方法	PID 方法
横滚角	0.012	0.134	0.098
俯仰角	0.025	0.212	0.102
航向角	0.028	0.109	0.153

分析表 1 可知,在相同实验参数下,本文方法进行无人机控制的姿态参数控制性能较好,姿态角的误差较低,定位精度相较于其他两者分别提高了横滚角:34%、462%,俯仰角:55%、23%,航向角:72%、61%,在无人机姿态控制算法中表现出较大的优势。

4 结 论

无人机的低空飞行中,容易受到气流扰动的影响,导致空间飞行的抗扰动能力不好,为了提高无人机飞行的稳定性,进行抗扰动控制设计,本文提出一种基于多维谱峰联合加权搜索的无人机控制抗扰动算法。构建无人机飞行的空间动力学模型,采用分布源建模方法进行无人机飞行的波束指向性特征分析,利用波束域方向的加权系数控制无人机的稳态跟踪误差,结合波束主瓣宽度进行飞行小扰动抑制,采用多维谱峰联合加权搜索方法实现对无人机飞行控制参量的联合估计,根据参量估计结果进行误差反馈和扰动抑制,提高飞行稳定控制性能。研究得知,采用本文方法进行无人机控制的抗扰动性较好,对飞行控制参量的联合估计准确性较高,输出稳定性较好,提高了无人机飞行控制中的波束形成能力。本文方法在对无人机的横滚角、俯仰角、航向角姿态稳定性控制中具有优势,提高了无人机的定姿抗扰控制能力。未来将进一步对无人机全姿态导致运动角度过大出现奇异点的问题进行研究,提升控制算法的鲁棒性。

参考文献

- [1] 陆兴华. 姿态融合滤波的无人机抗干扰控制算法[J]. 传感器与微系统, 2016, 35(7): 116-119.
- [2] GENG L, ZHANG Y F, FUH J Y H. A neural network based approach to 5-axis tool-path length estimation for optimal multi-cutter selection [J]. Computer-Aided Design and Applications, 2011, 8(2): 301-313.
- [3] TIAN Z G, WANG W. Special issue on machine fault diagnostics and prognostics [J]. Chinese Journal of

- Mechanical Engineering, 2017, 30(6): 1283-1284.
- [4] LI D Z, WANG W, ISMAIL F. An intelligent harmonic synthesis technique for air-gap eccentricity fault diagnosis in induction motors[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(6): 1296-1304.
- [5] SAMANO A, CASTRO R, LOZANO R, et al. Modeling and stabilization of a multi-rotor helicopter[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2013, 69 (1-4): 161-169.
- [6] BORISOV O I, GROMOV V S, PYRKIN A A, et al. Output robust control with anti-windup compensation for quadcopters [J]. IFAC Papers OnLine, 2016, 49(13): 287-292.
- [7] 陆兴华, 詹世尉, 余文权. 最陡下滑轨迹中无人机的航向校正控制算法 [J]. 计算机与数字工程, 2016, 44(12): 2370-2374, 2425.
- [8] 栾小丽 王志强 刘飞. 多变量非方系统集中式 PI 控制器设计[J]. 控制与决策, 2016, 31(5): 811-816.
- [9] 杜立夫, 蔡高华, 黄万伟, 等. 高超声速再入飞行器抗饱和和控制系统设计 [J]. 航天控制, 2016, 34(2): 9-14.
- [10] TARBOURIECH S, PRIEUR C, DA SILVA JR J M G. Stability analysis and stabilization of systems presenting nested saturations[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2006, 51(8): 1364-1371.
- [11] 吕富勇, 周瑞卿, 阮世阳, 等. 高频磁场检测中采样保持器的设计及其性能分析[J]. 电子测量技术, 2015, 38(8): 13-16.
- [12] 张冀, 徐科军. 自动生成转速参考曲线的电动执行器定位方法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(11): 1222-1234.
- [13] 安慰宁, 张福民, 吴翰钟, 等. 一种基于飞秒光频梳频域干涉的绝对测距方法 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(11): 2458-2465.
- [14] 梁景奇, 党建军, 罗凯, 等. 基于耦合运动的潜射运载器上浮弹道数值仿真 [J]. 水下无人系统学报, 2017, 25(4): 326-331.
- [15] 王华, 康荣杰, 王兴坚, 等. 软体弯曲驱动器设计与建模 [J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43 (5): 1053-1060.

作者简介

刘炜, 硕士, 讲师, 主要研究方向为计算机控制、算法。

E-mail: 157207002@qq.com