

引用格式: 崔雪锴, 白越, 裴信彪. 基于模糊PID的球形两栖机器人的设计及控制[J]. 电光与控制, 2024, 31(3): 99-103, 114. CUI X K, BAI Y, PEI X B. Design and control of a spherical amphibious robot based on fuzzy PID[J]. Electronics Optics & Control, 2024, 31(3): 99-103, 114.

基于模糊PID的球形两栖机器人的设计及控制

崔雪锴^{1,2}, 白越¹, 裴信彪¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130000; 2. 中国科学院大学, 北京 100000)

摘要: 为了解决移动机器人对工作环境要求严格的问题, 设计了一种适用于多变、狭窄环境的轻小型球形陆空两栖机器人, 具有地面滚动和空中飞行两种运动模式, 可以自主完成运动模式的切换。首先, 设计了机器人的结构, 包括滚动部分、飞行部分和模式切换部分。基于拉格朗日方法, 建立了不同运动模式下的动力学模型, 建立了基于欧拉方程的运动学模型。最后, 根据机器人的运动模型, 设计了飞行模式和地面滚动模式下的姿态控制器, 并对控制器进行了仿真对比实验。在实物上进行了测试, 实验结果表明, 该机器人能够实现自主模式切换, 在不同运动模式下运动稳定、姿态可控, 在纯地面模式下具有一定的越障能力。在结构、控制方法及控制策略切换方法上对陆空两栖可变形机器人具有一定借鉴作用。

关键词: 陆空两栖机器人; 地面滚动; 空中飞行; 自主模式切换; 姿态控制

中图分类号: TH122; TP13 文献标志码: A doi: 10.3969/j.issn.1671-637X.2024.03.017

Design and Control of a Spherical Amphibious Robot Based on Fuzzy PID

CUI Xuekai^{1,2}, BAI Yue¹, PEI Xinbiao¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130000, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100000, China)

Abstract: In order to solve the problem that mobile robots have strict requirements on operation environment, a light and small spherical land-air amphibious robot is designed, which can be applied to variable and narrow environments. It has two motion modes of rolling on the ground and flying in the air, and it can complete the switching of motion modes autonomously. Firstly, the structure of the robot is designed, including the rolling part, the flight part and the mode-switching part. Based on the Lagrangian method, the kinetic model in different motion modes is established, and the kinematic model based on the Euler equation is established. Finally, according to the motion models of the robot, the attitude controllers in flight mode and in ground-rolling mode are designed, and the comparative simulation experiments of the controllers are conducted. The tests were conducted on a real robot. The experimental results show that the robot can achieve autonomous mode switching and stable motion in different motion modes with controllable attitude, and has certain obstacle-crossing ability in pure ground mode. The structure, the control method and the control strategy switching method are useful for the land-air amphibious deformable robot.

Key words: land-air amphibious robot; ground-rolling; air flight; autonomous mode switching; attitude control

0 引言

随着机器人及计算机视觉技术的不断发展, 特种

机器人搭载光学镜头或武器等装备进行作业的场景也越来越多, 如无人机搭载相机进行地图建模、电力巡检、军用及警用无人机搭载光谱仪等设备进行侦察、扫毒等工作。但现有移动型机器人大多只能单一环境作业, 常见的有无人机、无人小车等。虽然当前有部分机器人平台兼具多栖运动能力^[1], 但往往是无人机与小车的简单组合, 结构冗余, 所需运动空间较大, 不能适应狭小空间下的作业, 且当前无人机续航时间普遍偏

收稿日期: 2023-04-13

修回日期: 2023-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(11372309, 61304017); 中国科学院轻型动力创新研究院创新引导基金项目(CXYJJ20-ZD-03); 吉林省科技发展计划项目(20200201294JC)

作者简介: 崔雪锴(1997—), 男, 山西大同人, 硕士。

通讯作者: 白越(1979—), 男, 吉林长春人, 博士, 研究员, 博导。

短,无人机与小车的简单叠加大大增加了载具本身的自重^[2-3],严重影响续航时间。针对上述问题,设计了一种可变形球形陆空两栖机器人。机器人通过变形可以实现地面球形机器人及空中四旋翼构型的自主切换,采用一个驱动电机实现模式的切换,整机质量轻、体积小、续航时间长,对其他可变形两栖机器人在结构、控制上具有一定的借鉴作用^[4]。

1 球形两栖机器人结构设计

1.1 多运动模式结构设计

地面运动模式下机器人构型选择球形机器人,飞行模式构型选择四旋翼^[5-6]。球形机器人相较于传统轮式、足式、履带式机器人无倾倒问题,具有较好的动态平衡性。飞行模式下四旋翼构型结构对称,利于地面运动模式下的静态稳定性。图1为机器人地面滚动模式和飞行模式的结构示意图。

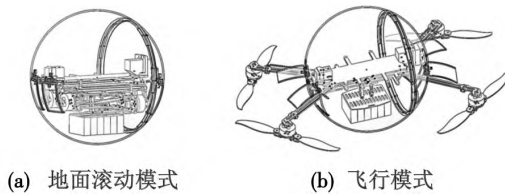


图1 球形两栖机器人结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of spherical amphibious robot structure

1.2 模式切换部分结构设计

当前常见陆空两栖机器人外形尺寸都偏大,造成这个问题的主要原因为:飞行模式下多采用无刷直流电机,而无刷直流电机停转后停止位置是不固定的,因此桨叶的停止位置也是不固定的,所以必须给桨叶留出足够的旋转空间,这使得机器人外形尺寸和自重较大,影响机器人运动续航时间。针对此问题,设计了一种模式切换方式,解决桨叶停转后位置不确定的问题。

模式切换部分由两组丝杠滑块机构和收桨机构组成,如图2所示。两组丝杠滑块机构通过一对圆柱齿轮连接,每个滑块上分别连接两组电机臂,滑块带动飞行动力系统直线运动实现模式的切换。

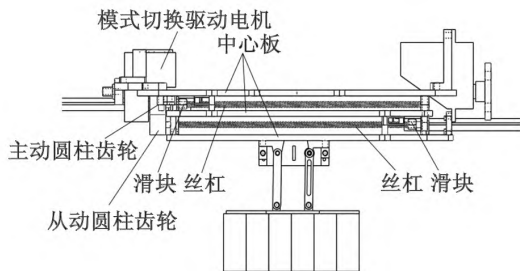


图2 模式切换整体示意图

Fig.2 Overall schematic diagram of mode switching

图3为两种运动模式下的丝杠滑块机构状态示意图。

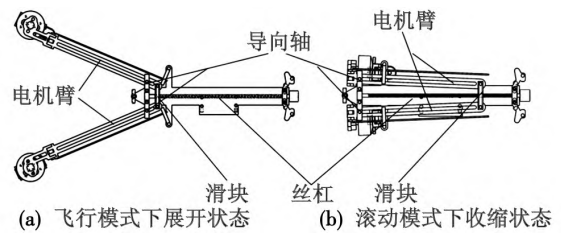


图3 不同运动模式下状态

Fig.3 State in different motion modes

图4为收桨部分结构示意图,要实现载具的运动模式完全自主切换,必须解决螺旋桨停转后位置不确定的问题,通过折叠螺旋桨和折叠桨夹的方式,实现螺旋桨的回收。

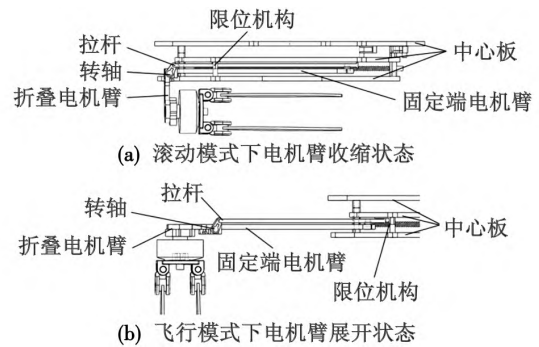


图4 收桨部分示意图

Fig.4 Schematic diagram of the propeller retraction section

2 球形两栖机器人复合运动控制器设计

2.1 复合运动下的运动学模型

本文采用欧拉角描述载具运动时的姿态^[7-9],设机体坐标系为 $O_b X_b Y_b Z_b$,参考坐标系为 $O_n X_n Y_n Z_n$,设偏航角为 φ ,俯仰角为 θ ,横滚角为 γ ,如图5所示。

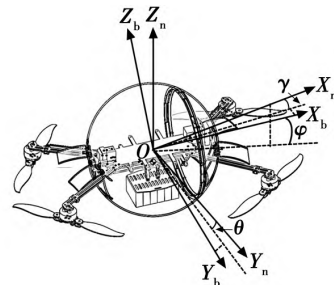


图5 坐标转换示意图

Fig.5 Schematic diagram of coordinate conversion

机器人在运动时的姿态变化,可以看作机体坐标系分别绕参考坐标系做3次旋转而来,因此分别讨论3次单独的旋转,得到单独旋转的坐标系,再计算得出完整的载具运动坐标转换矩阵,即

$$C_n^b = C_n^1 C_1^2 C_2^b \quad (1)$$

式中:

$$C_n^1 = \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad (2)$$

$$C_1^2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}; \quad (3)$$

$$C_2^b = \begin{pmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{pmatrix}。 \quad (4)$$

将式(2)、(3)、(4)代入式(1)可得载具完备的坐标转换矩阵为

$$C_n^b = \begin{pmatrix} \cos \varphi \cos \gamma + \sin \varphi \sin \theta \sin \gamma & -\sin \varphi \cos \gamma + \cos \varphi \sin \theta \sin \gamma & -\cos \theta \sin \gamma \\ \sin \varphi \cos \theta & \cos \varphi \cos \theta & \sin \theta \\ \cos \varphi \sin \gamma - \sin \varphi \sin \theta \cos \gamma & -\sin \varphi \sin \gamma - \cos \varphi \sin \theta \cos \gamma & \cos \theta \cos \gamma \end{pmatrix}。$$

2.2 复合运动下的动力学模型

首先,建立机体坐标系 $O_b X_b Y_b Z_b$ 及参考坐标系 $O_n X_n Y_n Z_n$ 根据牛顿第二定律可知

$$m \dot{\mathbf{v}}^n = \mathbf{G}^n - \mathbf{F}^b \quad (5)$$

式中: $\dot{\mathbf{v}}^n$ 为速度; \mathbf{G}^n 为重力; \mathbf{F}^b 为螺旋桨拉力。本文讨论飞行模式下的位置动力学模型和姿态动力学模型,以及滚动模式下的姿态动力学模型^[10]。

根据式(5)可得

$$\dot{\mathbf{v}}^n = \mathbf{g} \mathbf{n}_3 - \mathbf{F}^b \mathbf{C}_b^n \mathbf{n}_3 / m \quad (6)$$

式中 \mathbf{n}_3 为参考坐标系下的单位矩阵。将单位矩阵与坐标转换矩阵代入式(6),可得飞行模式下的位置动力学模型为

$$\begin{cases} \dot{v}_x = -F^b (\cos \varphi \sin \theta \cos \gamma + \sin \varphi \sin \gamma) / m \\ \dot{v}_y = -F^b (\sin \varphi \sin \theta \cos \gamma + \cos \varphi \sin \gamma) / m \\ \dot{v}_z = g - F^b \cos \theta \cos \gamma / m \end{cases}。 \quad (7)$$

根据欧拉方程 $\mathbf{M}' = \mathbf{J} \dot{\boldsymbol{\omega}}^b + \boldsymbol{\omega}^b \times \mathbf{J} \boldsymbol{\omega}^b$ 可得

$$\mathbf{M}' = \mathbf{G}_a + \boldsymbol{\tau} \quad (8)$$

式中: \mathbf{M}' 为转矩; \mathbf{J} 为转动惯量; $\boldsymbol{\tau}$ 为机体绕旋转轴的力矩 $\boldsymbol{\tau} = (\tau_x \ \tau_y \ \tau_z)^T$; 角速度 $\boldsymbol{\omega}^b = (\dot{\gamma} \ \dot{\theta} \ \dot{\varphi})^T = (p \ q \ r)^T$; \mathbf{G}_a 为螺旋桨反扭力矩,其表达式为

$$\mathbf{G}_a = \begin{pmatrix} \mathbf{G}_{a \ \gamma} \\ \mathbf{G}_{a \ \theta} \\ \mathbf{G}_{a \ \varphi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{J}_{RP} (\boldsymbol{\omega}_1 - \boldsymbol{\omega}_2 + \boldsymbol{\omega}_3 - \boldsymbol{\omega}_4) \\ \mathbf{J}_{RP} (-\boldsymbol{\omega}_1 + \boldsymbol{\omega}_2 - \boldsymbol{\omega}_3 + \boldsymbol{\omega}_4) \\ 0 \end{pmatrix}。 \quad (9)$$

联立式(8)、式(9)可得飞行模式下的姿态动力学模型为

$$\begin{cases} \ddot{\gamma} = [\tau_x + qr(I_{yy} - I_{zz}) - J_{RP} q \Omega] / I_{xx} \\ \ddot{\theta} = [\tau_y + pr(I_{xx} - I_{zz}) - J_{RP} p \Omega] / I_{yy} \\ \ddot{\varphi} = [\tau_z + pq(I_{xx} - I_{yy})] / I_{zz} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\boldsymbol{\Omega}$ 为角速度向量; \mathbf{I} 为系统绕质心转动惯量。

在滚动模式下,由于机器人没有绕 Z 轴方向的转矩,因此只讨论其俯仰角与横滚角的动力学模型。推导过程中各参数意义如表 1 所示。

表 1 各参数意义说明

Table 1 The meaning of each parameter

参数	意义	参数	意义
M	均质球壳质量	h	内部支撑框架质心到球心距离
m_1	内部支撑框架质量	θ	机器人俯仰角
m_2	配重块质量	γ	机器人横滚角
R	均质球壳半径	φ	配重块在机体坐标系下偏转角度
d	质量块质心到球心距离	T_1	滚动驱动电机输出转矩
a	质量块摆臂长度	T_2	摆动驱动电机输出转矩

根据拉格朗日方程

$$L = E_{q_1} + E_{q_2} + E_{q_3} + E_{q_4} - E_p \quad (11)$$

建立滚动模式下的动力学模型。式中: E_{q_1} 、 E_{q_2} 、 E_{q_3} 、 E_{q_4} 分别为内部支撑框架动能、均质球壳动能、质量块动能、驱动单元输出轴动能; E_p 为系统势能。

设 S 为移动距离, J_M 为球壳对球心的转动惯量, J_1 为滚动驱动电机输出轴的转动惯量, J_2 为质量块驱动电机输出轴的转动惯量, 则有

$$E_{q_1} = \frac{1}{2} m_1 \dot{S}^2 + \frac{1}{2} m_1 (\dot{\theta} h)^2 + \frac{1}{2} (\varphi h \sin \theta \dot{\theta})^2 \quad (12)$$

$$E_{q_2} = \frac{1}{2} (M + J_M / R^2) \dot{S}^2 \quad (13)$$

$$E_{q_3} = m_2 (\dot{\theta} d)^2 / 2 + m_2 (\dot{\gamma} a)^2 / 2 \quad (14)$$

$$E_{q_4} = J_1 \dot{\theta}^2 / 2 + J_2 \dot{\gamma}^2 / 2 \quad (15)$$

$$E_p = m_1 g (h - h \cos \theta) + m_2 g (d - d \cos \varphi \cos \theta)。 \quad (16)$$

在滚动时机器人有 4 个自由度,但在只考虑俯仰与横滚通道的情况下,只取 2 个通道。根据拉格朗日方程,欠驱动系统不完全约束时^[11]有

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \mathbf{q}} = \mathbf{Q}。 \quad (17)$$

联立式(11)~(17)可得滚动模式下姿态动力学模型为

$$\begin{cases} (m_1 l^2 + m_2 d^2 + J_1) \ddot{\theta} - m_1 g h \sin \theta + m_2 g d \sin \theta = T_1 - F_{f1} r \\ m_2 a^2 \ddot{\gamma} + J_2 \ddot{\gamma} = T_2 - m_2 g d \sin \gamma \end{cases} \quad (18)$$

式中: F_{f1} 为滚动驱动电机与输出轴之间损耗力; r 为滚动驱动电机输出轴的半径。

2.3 复合运动控制器设计

2.3.1 基于串级 PID 的飞行姿态控制器

在飞行模式下,可以推导出完整的飞行动力学模型。在对比模糊 PID 与串级 PID 两种控制方法后发现,在飞行模式下模糊 PID 对飞行姿态提升不大。为节省处理器算力,飞行模式采用串级 PID 的方法:外环为角度环,采用比例控制,输入 e_1 为期望姿态角与实际姿

态角误差,输出 ω 为角速度;内环为角速度环,采用 PID 控制,输出为角加速度。则控制律为

$$\begin{cases} \omega = K_p e_1 \\ \dot{\omega} = K_{pv} e_{\omega} + K_{iv} \int e_{\omega} + K_{dv} \dot{e}_{\omega} \end{cases} \quad (19)$$

2.3.2 基于模糊 PID 的滚动模式姿态控制器

根据上文的推导,机器人在地面运动模式下是一个欠驱动的不完整非线性系统,得到的动力学模型不能完全准确描述系统,因此滚动模式下姿态控制采用模糊 PID 的方法,通过模糊控制自整定在滚动过程中的 PID 参数,达到较好的控制效果。

设置控制器的初始参数 K_{p0}, K_{i0}, K_{d0} ,将初始参数输入到 PID 控制器中获得初始的控制量,控制量在电机库转换为相应执行机构的 PWM 值,机器人开始运动,通过惯性测量单元反馈实时的姿态信息,与期望值做差得到姿态误差,即角度误差 e 与角速度误差 \dot{e} ,将偏差值转换为相应的梯形隶属函数值 u_e 和 $u_{\dot{e}}$,即

$$u_e = \begin{cases} 0 & d_{\omega} \leq a_{i(e)} \\ \frac{d_{\omega} - a_{i(e)}}{a_{i+1(e)} - a_{i(e)}} & a_{i(e)} \leq d_{\omega} \leq a_{i+1(e)} \\ 1 & a_{i+1(e)} \leq d_{\omega} \leq a_{i+2(e)} \\ \frac{a_{i+3(e)} - d_{\omega}}{a_{i+3(e)} - a_{i+2(e)}} & a_{i+2(e)} \leq d_{\omega} \leq a_{i+3(e)} \\ 0 & d_{\omega} \geq a_{i+3(e)} \end{cases} \quad (20)$$

$$u_{\dot{e}} = \begin{cases} 0 & d_{\dot{\omega}} \leq a_{i(\dot{e})} \\ \frac{d_{\dot{\omega}} - a_{i(\dot{e})}}{a_{i+1(\dot{e})} - a_{i(\dot{e})}} & a_{i(\dot{e})} \leq d_{\dot{\omega}} \leq a_{i+1(\dot{e})} \\ 1 & a_{i+1(\dot{e})} \leq d_{\dot{\omega}} \leq a_{i+2(\dot{e})} \\ \frac{a_{i+3(\dot{e})} - d_{\dot{\omega}}}{a_{i+3(\dot{e})} - a_{i+2(\dot{e})}} & a_{i+2(\dot{e})} \leq d_{\dot{\omega}} \leq a_{i+3(\dot{e})} \\ 0 & d_{\dot{\omega}} \geq a_{i+3(\dot{e})} \end{cases} \quad (21)$$

其中 $d_{\omega}, d_{\dot{\omega}}$ 分别为角度误差 e, \dot{e} 的期望值和实际值的差值。

根据 PID 控制原理制定如下模糊规则:

- 1) 当姿态误差大时,需要增大 K_p 值,使系统快速响应,但较大的误差会导致积分项饱和,所以 K_i 要减小,并且 K_p 增大导致系统响应快,误差变化率增大,因此减小微分项,所以 K_d 减小;
- 2) 当误差中等大小时,需要减小 K_p ,避免产生较大超调量,为避免积分饱和此时继续取较小 K_i 值,但为了提高系统响应速度,此时要选取相对较大 K_d 值;
- 3) 当误差很小时,为了减小稳态误差 K_i 选取较大值,同时为了减小超调量,克服振荡,选择较大 K_d 值。

模糊规则如表 2~4 所示,表中 NB、NM、NS、ZO、PS、PM、PB 代表模糊子集论域对应的模糊输入、输出。

表 2 K_p 模糊规则

Table 2 Fuzzy rules of K_p

		e						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
de	NB	PM	PM	PM	PM	PS	ZO	ZO
	NM	PB	PB	PM	PS	NS	ZO	NS
	NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
	ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
	PS	PM	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
	PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
	PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表 3 K_i 模糊规则

Table 3 Fuzzy rules of K_i

		e						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
de	NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
	NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
	NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
	ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
	PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
	PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
	PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

表 4 K_d 模糊规则

Table 4 Fuzzy rules of K_d

		e						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
de	NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
	NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
	NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
	ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
	PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
	PM	PB	PS	PS	PS	PS	PS	PB
	PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

2.3.3 控制策略切换方法

机器人在上电之后,需要在姿态相对平稳的状态下自检,获取传感器数据后解锁开始运动,如果在机器人切换模式后再次自检,可能会出现传感器数据偏移的情况。分析机器人的结构可知,不同的运动模式下机体坐标系是始终重合的,滚动姿态和飞行姿态与内部支撑框架的姿态是完全一致的,由于坐标系的始终重合,因此在不同的运动模式下,机器人进行姿态解算所使用的传感器数据是一样的。为实现控制策略的平滑切换,机器人上电后,完成两种运动模式的自检,处理器同时开始不同运动模式的姿态控制器解算,获得不同模式下执行机构的 PWM 值,在最终输出环节,通过将不需要的驱动电机 PWM 值置零的方式限制执行机构运动,当模式切换时,只需将最终的 PWM 输出数组对应项置零即可实现模式切换,而不必再次进行自检。

这种方式需要处理器有较强的运算能力,针对此问题,采用主处理器与协处理器配合的方式,主处理器

为 stm32f765 ,负责运动控制算法的解算 ,协处理器为 stm32f103 ,负责传感器数据的解算及数据融合 ,以减小主处理器的运算压力。

3 仿真与实机测试实验

对飞行模式及地面滚动模式下的姿态控制器进行仿真实验 ,对比模糊 PID 与串级 PID 的控制效果 ,结果如图 6 所示。

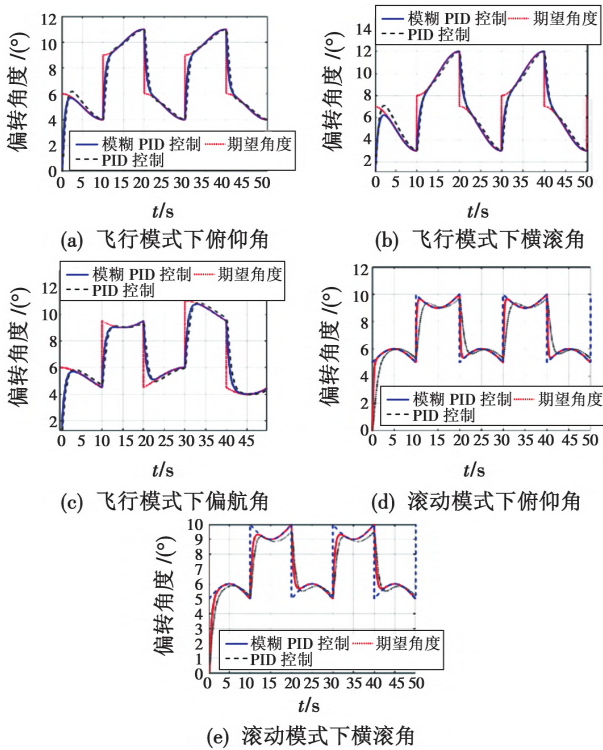


图 6 控制器对比仿真结果

Fig. 6 Simulation results of the controllers

根据图 6 可知 ,飞行模式下由于系统运动模型准确描述 ,采用模糊 PID 的控制方式相较于传统串级 PID 控制方法提升效果不明显 ,在得到准确的运动模型前提下 ,采用串级 PID 的控制方法可以简单有效地得到很好的控制效果 ,系统超调量最大为 1.6° ,在可接受范围之内。在滚动模式下采用模糊 PID 控制方法可以弥补运动模型无法完全描述的不足 ,相较于传统串级 PID ,在超调量及响应时间性能上有明显的提升。

滚动模式下的测试如图 7 所示。



图 7 滚动模式测试

Fig. 7 Test in rolling mode

记录运动日志结果如图 8 所示。

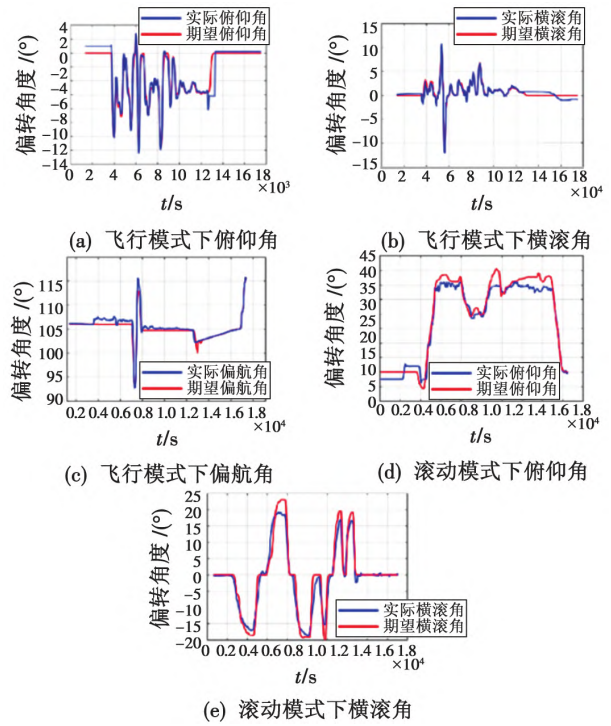


图 8 实机测试结果

Fig. 8 Live test results

根据实机测试结果 ,飞行模式下姿态角控制良好 ,在落地瞬间会出现姿态不稳 ,但飞行过程中姿态很稳定。在滚动模式下当期望角度大于 35° 后 ,实际俯仰角度无法再跟随期望角度 ,但在 35° 以下时 ,俯仰角可以得到很好的控制效果 ,分析原因为执行机构输出转矩不够所导致 ,这为后续的优化做出了指导。

4 结论

本文设计了一种小型空间受限的球形两栖机器人 ,提出了一种新型的两栖载具模式切换的结构 ,解决了陆空两栖载具的收桨不确定性问题。建立了机器人的运动模型 ,针对所建立的运动模型 ,设计了基于串级 PID 的飞行姿态控制器以及模糊 PID 滚动姿态控制器 ,并通过仿真与实机测试验证了该机器人结构及控制的可行性。通过完整运动流程的实机测试验证 ,该机器人可以实现 12 min 的纯飞行运动及 1 h 以上的纯滚动运动 ,自主模式切换时间为 16 s ,具有一定的实际工程意义。

参考文献

[1] 邱春图,陈振中. 无人战斗机结构安全系数的确定[J]. 飞机设计 2005, 25(4): 22-28.

[2] 孙一方,王云,张飞,等. 某新型飞行汽车的飞行动力系统的结构设计[J]. 机械设计 2019, 36(1): 76-80.

(下转第 114 页)

- Aerospace Sciences, 2007, 43: 218-245.
- [7] 刘丰瑞. 基于多路温控的目标红外辐射特性测试研究 [D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2020.
- [8] 吴行, 郭巍, 郑振忠. 装甲车辆红外隐身技术的发展趋势 [J]. 中国表面工程, 2011, 24(1): 6-11.
- [9] VARNEY G E. Infrared signature measurement techniques and simulation methods for aircraft survivability [C]//The 15th Joint Propulsion Conference. Las Vegas: AIAA, 1979: 1186-1203.
- [10] LU J W, WANG Q. Aircraft-skin infrared radiation characteristics modeling and analysis [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2009, 22(5): 493-497.
- [11] 谈和平, 夏新林, 刘林华, 等. 红外辐射特性与传输的数值计算 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006.
- [12] 赵会妮, 熊兵, 周兵, 等. 航空发动机排气系统红外辐射测量与数值计算比较研究 [J]. 燃气涡轮试验与研究, 2017, 30(1): 36-40.
- [13] 王彪, 丛伟, 王超哲, 等. 隐身战斗机红外辐射特征计算及红外隐身效果分析 [J]. 北京理工大学学报, 2019, 39(4): 365-371.
- [14] 刘涛, 丁旭, 张琦. 航空发动机整机红外辐射特性台架试验方案研究 [J]. 现代机械, 2020(1): 41-45.
- [15] 胡丽萍, 王智慧, 满红, 等. 坦克装甲车辆红外隐身技术的发展 [J]. 光机电信息, 2009, 26(8): 24-27.
- [16] 关玉波, 尚守堂, 王东明, 等. 发动机整机红外辐射特性测试方案研究 [J]. 测控技术, 201, 33(增刊1): 102-105.

(上接第 103 页)

- [3] 马龙. 具有质心径向可变能力的球形机器人机构设计及控制方法研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2021.
- [4] 周爱国. 单球驱动机器人 Ballbot 的建模与控制研究 [J]. 机电一体化, 2012, 18(11): 3-15.
- [5] 蔡克霞. 利用应力、强度模型确定安全系数 [J]. 宁夏大学学报(自然科学版), 2000, 21(3): 223-225.
- [6] 赵勃. 同轴双偏心质量驱动球形机器人系统建立及运动控制研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [7] 全权. 多旋翼飞行器设计与控制 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2018: 64-70.
- [8] 孙汉旭, 王亮清, 贾庆轩, 等. BYQ-3 球形机器人的动力学模型 [J]. 机械工程学报, 2009, 45(10): 8-14.
- [9] 廖丹, 高宏力, 宋兴国, 等. 球形机器人系统建模与仿真 [J]. 机械设计与制造, 2020(2): 260-262, 266.
- [10] 马梦. 可倾转旋翼飞行爬壁机器人的设计与分析 [D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- [11] 冯宜明, 王建中, 施家栋. 基于自适应的变形式陆空机器人转域过程飞行控制 [J]. 航空学报, 2019, 40(6): 322691.

下 期 要 目

基于 cosSTR-YOLOv7 的多尺度遥感小目标检测
 攻击角约束的任意时间三维制导律设计
 基于 DRFM 的雷达干扰信号识别算法综述
 基于 CMPSO 算法的无人机复杂三维路径规划
 可调谐激光器多闭环控制驱动系统设计
 基于改进 YOLOv5s 的无人机图像识别
 基于改进遗传算法的多无人机搜索航路规划
 基于改进 ADC 法的侦察无人机作战效能评估

基于改进 CFSFDP 的雷达信号预分选方法
 基于高效通道注意力的多阶段图像去雨网络
 无人机协同定位防欺骗的 WGAN-TM 识别方法
 一种雷达辐射源智能个体识别的方法
 改进蚁群算法的无人机航迹规划
 基于事件触发的航空器目标跟踪算法
 无人机自主作战效能评估技术研究综述
 多 IRST 自适应协同定位技术研究