

空地双模式仿蠕虫移动机器人的设计与动力学建模^{*}

王朗亭 张舒[†]

(同济大学 航空航天与力学学院, 上海 200092)

摘要 针对仿蠕虫移动机器人在开阔地带快速移动能力不足的局限性,提出一种空地双模式仿蠕虫移动机器人,通过融合空中飞行与地面蠕动模式,提升其在环境中的适应性与移动效率.采用弹簧钢片与伺服电机拉伸鱼线模拟环向肌肉与纵向肌肉的拮抗作用;空中飞行模式采用横列式双倾转涵道布局,通过舵机直驱控制涵道倾角,结合PID控制实现推力矢量调节.分别建立地面模式的质量-刚度-阻尼模型与飞行模式的Newton-Euler动力学模型,提出模块化控制系统架构,集成仿生驱动、姿态解算与多模式协同控制功能.实验表明,机器人单个单元收缩/伸展变形量达13.9%,使机器人能在直径11 cm的管道内爬行.模式切换时,采用V型构型使涵道轴距垂直高度增加218.4%,提升飞行稳定性.涵道系统最大升力为40.57 N,总质量控制在2 kg以内,达到机器人正常起飞要求.

关键词 仿蠕虫移动机器人, 空地双模式机器人, 双倾转涵道无人机, 动力学模型

中图分类号:V21

文献标志码:A

Design and Dynamics Modeling of an Earthworm-Like Mobile Robot with Dual Air-Ground Locomotion Modes^{*}

Wang Langting Zhang Shu[†]

(School of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract To address the limitations of the earthworm-like locomotion robot in rapid locomotion across open terrains, an earthworm-like locomotion robot with dual air-ground locomotion modes is proposed, which enhances environmental adaptability and mobility efficiency through integrated aerial flight and terrestrial peristaltic locomotion. Antagonistic interactions between circular and longitudinal muscles are simulated using spring steel strips and servo motor-driven fishing lines. The aerial flight mode employs a tandem dual-tilt ducted configuration, where duct tilt angles are directly driven by servo motors to achieve thrust vector regulation through PID control. A mass-spring-damper model for terrestrial locomotion and a Newton-Euler dynamic model for aerial navigation are established respectively. A modular control system architecture is developed, integrating bio-inspired actuation, attitude resolution, and multi-mode coordination. Experimental results demonstrate that single-unit contraction/extension deformation reaches 13.9%, enabling pipeline crawling within 11 cm diameter-constrained environments. During mode transition, a V-shaped configuration increases vertical duct span by 218.4%, significantly enhancing flight stability. The duct system generates maximum lift of 40.57 N while maintaining total mass below 2 kg, satisfying basic flight requirements.

2025-04-04 收到第1稿, 2025-04-25 收到修改稿.

^{*} 国家自然科学基金资助项目(11932015, 12472022), National Natural Science Foundation of China (11932015, 12472022).

[†] 通信作者 E-mail: zhangshu@tongji.edu.cn

Key words earthworm-like locomotion robot, dual air-ground locomotion modes robot, dual-tilt ducted UAV, dynamic model

引言

当代科技革命浪潮中,机器人技术正以革命性方式重塑人类社会运作模式.作为该领域的前沿研究方向,仿生机器人系统凭借其生物启发的创新设计理念与卓越的工程性能表现,持续推动着机器人技术的范式转变.在众多仿生机器人研究分支中,基于蠕虫运动机理的移动机器人因其独特仿生运动机理和卓越环境适应性,已成为前沿研究热点^[1].但现有仿蠕虫移动机器人系统在开阔地形快速移动能力存在显著缺陷,这一技术瓶颈制约了其应用范围.针对这一关键问题,本文提出了空地双模式机器人的创新性设计理念.该技术方案通过整合旋翼飞行与仿生蠕动两种运动模式,既能保持传统仿蠕虫机器人在受限空间内的运动优势,又可借助飞行模式突破地形限制,实现复杂环境下的高效机动.

早期的空地双模式机器人研究主要侧重于交通领域,通常被称为“飞行汽车”,具备在空中飞行和在陆地行驶的能力.除此之外,国内外学者也研发了多样化的空地双模式机器人. Kalantari 等^[2]设计的混合型陆地空中飞行器 HyTAQ,将四旋翼机包裹在一个外部笼子中,动力由四旋翼机构提供,而外部笼子通过铰链与四旋翼的中心轴线相连,类似于车轮的作用.另外, Kalantari 等^[3]设计的 Drivocopter 陆空两栖机器人采用了共轴双桨四旋翼来实现飞行功能,并将四轮放置在桨叶的外部来实现地面移动功能,同时在降落时提供了缓冲作用. Gefen 等^[4]开发的新型多模式机器人 FStar 在四个螺旋桨臂的另一侧安装了轮子,从而使机器人在地面上具备灵活的移动能力和高度的自适应调整能力.

综上所述,国际学术界已在运动机理解析、构型创新及多模式驱动策略等关键方向取得系列突破性进展,初步构建了具有工程指导意义的理论分析框架.值得注意的是,现有文献中关于高通过性仿蠕虫机器人飞行模块集成化设计的研究案例仍属空白.空地双模式仿蠕虫机器人系统通过融合仿生蠕动与涵道旋翼推进的协同机制,为复杂地形探

测开辟了新的技术路径.然而,其多模式运动协同需求,在实际应用中衍生出若干亟待解决的核心技术难题:首要难点在于如何有效抑制仿生柔性结构的动态形变,实现空中姿态的精确控制;此外,非线性动力学建模与双模式控制策略的设计也是一大难点.本文将重点研究机器人本体设计、动力学建模及双模式控制算法等关键问题,提出有效的控制策略,以实现机器人在复杂环境中的高效、稳定运动.

1 结构设计

1.1 地面爬行模式仿蠕虫结构设计

蚯蚓是一种无肢环节动物,其在形态结构与运动性能上拥有诸多优势,能够在土壤缝隙、草地以及岩石裂隙等非结构化环境中灵活穿梭.相关生物学研究表明^[5],蚯蚓的身体具有明显的分节特点,每个体节上均分布有环向肌肉、纵向肌肉以及能随体节形态变化而伸缩的刚毛,如图 1(a)所示.蚯蚓的蠕动运动是由于各体节上的环肌与纵肌相互拮抗变形,在其身体上形成向后的蠕动波,同时伴随着刚毛的伸出,从而使蚯蚓得以实现定向移动.相较于传统的轮式机器人和履带式机器人,依据蚯蚓的形态学特征及蠕动机理研发的仿蠕虫移动机器人,具备更强的狭窄空间穿越能力以及对非结构化环境的适应性.

基于生物蚯蚓的结构特征与运动特性, Fang 等^[6]提出仿蠕虫移动机器人的单元构型,如图 1(b)所示.

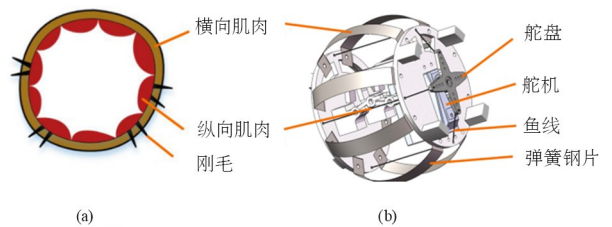


图 1 仿蠕虫结构设计:
(a)生物蚯蚓的横截面示意图;(b)单个单元的 SolidWorks 模型图
Fig. 1 Earthworm-like structure design: (a)Schematic cross-section of a biological earthworm;(b)SolidWorks model drawing of a single robot segment

机器人单个单元的实验样机主要由可变形的弹簧钢片与伺服电机构成。单元的两端安装有 3D 打印的隔板,这模拟了生物蚯蚓体节之间的隔膜。两块隔板间由 8 片厚度为 0.1 mm 的预弯曲 65 Mn 弹簧钢片连接,用来模拟蚯蚓的环向肌肉^[7]。其中一块隔板的一侧安装了伺服电机,其上方的舵盘系有牵引绳,类似于蚯蚓的纵向肌肉。对于初始未变形状态的单元,如图 2(a),随着舵机的转动,牵引绳缩短,两块隔板的间距缩小,单元逐渐形成收缩状态,这模拟了蚯蚓体节的环肌舒张与纵肌收缩的过程。对于收缩状态的单元,如图 2(b),舵机反向转动,牵引绳放松,受弹簧钢片恢复力作用,两块隔板的间距增加,单元逐渐恢复未变形状态,这对应了蚯蚓体节的环肌收缩与纵肌伸长的过程。此外,蚯蚓身体上的刚毛会随着体节的收缩而伸出,与外部环境接触形成“锚固”效应,使得蚯蚓能够获得有效的定向运动。而当体节处于放松状态时,刚毛会收缩回去以减小蚯蚓身体与外部环境的接触作用。由于仿蠕虫移动机器人爬行模式的实验环境为管道内,在单元逐渐收缩/放松的过程中,弹簧钢片发生形变,单元径向尺寸增大/减小,单元与管道内壁产生不同程度的挤压,使得机器人与管道间的摩擦力发生变化,从而模仿蚯蚓刚毛伸缩的效果。

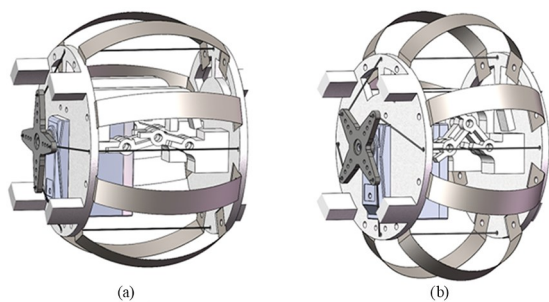


图 2 单个单元变形示意图:

(a)初始未变形状态的单元;(b)收缩状态的单元

Fig. 2 Single-segment deformation diagram: (a) Robot segment in initial undeformed state; (b) Robot segment in contracted state

1.2 空中飞行模式横列式双倾转涵道结构设计

为不影响机器人在地面狭窄空间移动的能力,飞行单元沿机器人轴向布置,如图 3 所示,在机器人的首尾对称布置两组飞行单元,每组飞行单元可绕 x_b 轴独立偏转。

在飞行系统设计方面,选择了涵道螺旋桨系统,而非传统的独立螺旋桨系统,即旋翼。当螺旋桨

尺寸与转速相同时,涵道螺旋桨系统相较于独立螺旋桨系统能够产生更大的升力^[8]。所以在尺寸选择受限的情况下,优先考虑选用能够在较小尺寸下提供较大升力的涵道螺旋桨系统。此外,涵道能够有效抑制尾流的收缩现象,同时还能增大滑流的出口面积,进而降低滑流的出口速度,减少在产生拉力过程中的诱导功率。而且,涵道可以显著降低旋翼运转时产生的噪声,其保护作用还能提升飞行器的安全性。在功率相同的情况下,由于涵道自身能够产生额外的升力,使得涵道旋翼系统产生的升力比独立旋翼系统更大,从而具备更佳悬停性能。

飞行单元的偏转是通过舵机直驱式传动实现的,如图 4 所示。直驱式传动是指舵机无需借助其他额外结构,能够直接调节涵道电机的倾转角度,舵机与涵道电机之间是直接相连的。这种结构的优势在于整体质量较轻、结构简单,但由于涵道电机与舵机输出轴是直接相连的状态,这对舵机的输出扭矩提出了较高的要求。

通过对两个涵道电机提供的升力以及升力与 $O_b x_b z_b$ 之间的夹角,即 $T_1, T_2, \delta_1, \delta_2$ 共计 4 个变量进行控制(如图 5),能够实现对机器人的平动和转动的控制(其中俯仰与 y 轴平移,横滚与 x 轴平移耦合),进而完成垂直起降、平移、转向等一系列运动。

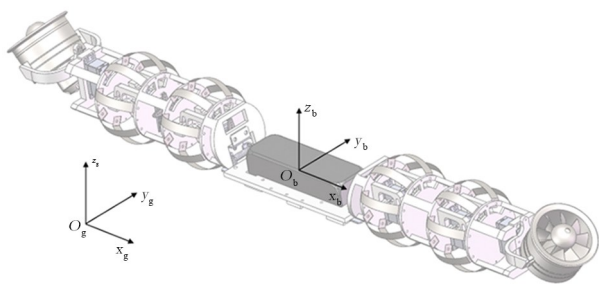


图 3 机器人样机 SolidWorks 三维模型

Fig. 3 SolidWorks 3D model of robot prototype

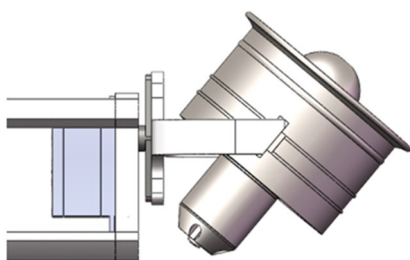


图 4 涵道倾转机

Fig. 4 Duct tilting mechanism

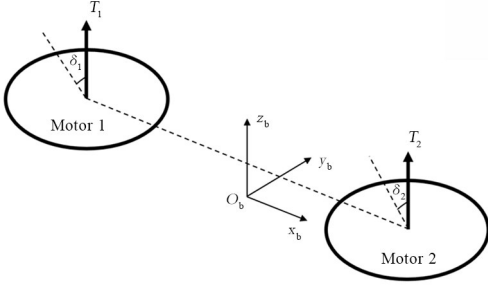


图5 双倾转涵道变量示意图

Fig. 5 Variants of the dual-tilt duct robot

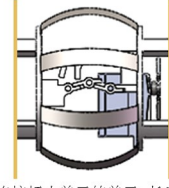
(c) 两侧均匀连接蠕虫单元的单元, 长度为 l_w , 质量为 m_w
(c) Segment with worm segment attached to both sides

图7 三种类型的单元

Fig. 7 Three types of segment

2 动力学建模

2.1 地面模式仿蠕虫结构的动力学模型

根据仿蠕虫结构设计, 给出如图 6(a) 所示的机器人单个单元的质量(m)—刚度(k)—阻尼(c)模型. 由于飞行单元和控制系统的加入, 每个单元在质量和长度上不尽相同, 但在刚度和阻尼上的设计相同. 在此可以将单元分为三种类型: 头尾连接飞行系统的单元, 中间连接控制系统的单元和两侧均连接蠕虫单元的单元, 如图 7 所示.

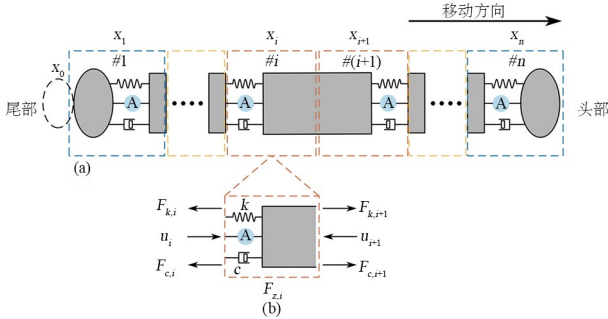
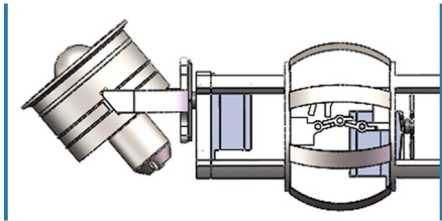
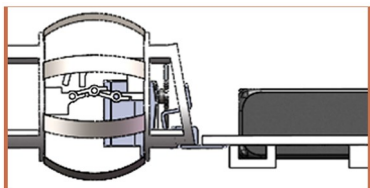


图6 仿蠕虫结构动力学模型: (a) 多蠕虫单元质量—刚度—阻尼动力学模型; (b) 单个单元受力分析图

Fig. 6 Dynamic model of earthworm-like structure: (a) Multi worm segments mass-stiffness-damping dynamics model; (b) Force analysis diagram for single segment

(a) 头尾连接飞行系统的单元, 长度为 l_f , 质量为 m_f
(a) Segment connecting flight systems at the head and tail(b) 中间连接控制系统的单元, 长度为 l_c , 质量为 m_c
(b) Segment connecting control systems in between

根据机器人对称结构, 若单侧有 n_w ($n_w \in \mathbb{N}$) 个两侧均连接蠕虫单元的单元, 则机器人总体原长为 $L_0 = 2(l_f + l_c + n_w l_w)$, 总质量为 $M_0 = 2(m_f + m_c + n_w m_w)$. 每个蠕虫单元具有相同的刚度 k 与阻尼 c . 将机器人的尾部单元到头部单元, 依次编号为 #1, #2, #3, ..., #n, 相应广义坐标依次为 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, 原长为 $l_{10}, l_{20}, l_{30}, \dots, l_{n0}$. 为方便后续建模, 尾部附加一个没有质量的虚拟刚体, 其广义坐标为 x_0 .

对各单元进行受力分析, 如图 6(b) 所示, 采用牛顿第二定律建立机器人的动力学模型^[9,10], 则第 i 个单元的动力学方程表示为

$$m_i \ddot{x}_i = F_{k,i+1} - F_{k,i} + F_{c,i+1} - F_{c,i} + u_i - u_{i+1} + F_{z,i}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中, $F_{k,i} = k(x_i - x_{i-1} - l_{i0})$ 为弹力, 且 $F_{k,n+1} = 0$; $F_{c,i} = c(\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1})$ 为阻尼力, 且 $F_{c,n+1} = 0$; u_i 为驱动力, 且 $u_{n+1} = 0$; $F_{z,i}$ 为摩擦力.

根据恒等相位差控制模式 (identical phase difference pattern, IPD) 生成蠕动波, 在动力学模型中设定单元理想长度变形函数为

$$l_i^{\text{obj}}(t) = l_{i0} - \frac{\Delta l}{2} + \frac{\Delta l}{2} \sin(\omega t - \beta_i), \quad (i = 1, \dots, n) \quad (2)$$

设定每个单元的最大收缩长度 Δl 与圆频率 ω 相同, 分别由设定的舵机旋转角度和每旋转一度所间隔的时间决定. 在 IPD 控制模式下, 相邻单元的相位差 $\Delta\beta$ 相同, β_i 为第 i 个单元的初相位, 可以表示为

$$\beta_i = (i - 1)\Delta\beta, \quad (i = 1, \dots, n) \quad (3)$$

实际单元的长度变化表示为相邻刚体间广义坐标之差

$$l_i^{\text{act}}(t) = x_i - x_{i-1}, \quad (i = 1, \dots, n) \quad (4)$$

机器人单元在变形移动过程中与外界环境接触, 受到的摩擦力采用库仑干摩擦模型来描述

$$F_{z,i} = -\left[\frac{l_{i0}}{l_i^{\text{act}}(t)}\right]^q \frac{M_0}{n} g \text{sgn}(\dot{x}_i), \quad (i = 1, \dots, n) \quad (5)$$

式中, q 为轴向变形影响因子, 当 $q = 0$ 时, 表明单元的变形不会影响摩擦力的大小. η 代表库仑摩擦系数, 与机器人和外部环境的接触有关. 摩擦模型中设定机器人受到各向异性的库仑摩擦力, 向前与向后滑移对应的库仑摩擦系数分别为 η_- 与 η_+ .

采用比例-微分(PD)算法对单元变形进行控制:

$$u_i(t) = k_{\text{p}} e_i(t) + k_{\text{D}} \dot{e}_i(t),$$
$$e_i(t) = l_i^{\text{obj}}(t) - l_i^{\text{act}}(t),$$
$$\dot{e}_i(t) = \dot{l}_i^{\text{obj}}(t) - \dot{l}_i^{\text{act}}(t) \quad (i = 1, \cdots, n) \quad (6)$$

式中, k_{p} 为比例系数, k_{D} 为微分系数, $e_i(t)$ 为实际长度与目标长度的偏差, \dot{e}_i 为该偏差对时间 t 的导数.

为验证地面爬行模式下动力学模型的准确性并优化控制参数配置, 后续研究了基于舵机驱动特性的参数化实验与仿真分析. 实验通过对伺服电机实施角度控制, 设定舵机旋转角度范围为 $48^\circ \sim 60^\circ$, 每旋转 1° 间隔时间为 $10 \text{ ms} \sim 25 \text{ ms}$, 共构建 18 组实验工况. 针对不同舵机旋转角度-间隔时间组合下的单元变形特性, 采集位移、速度以及加速度响应数据, 并通过动力学模型, 运用最小二乘法辨识出对应工况的 k_{p} 与 k_{D} (因实验中无法具体测得阻尼系数的数值, 此处将阻尼力代入 k_{D} 的辨识中). 图 8 展示了当舵机参数为 51° 、 10 ms 时, 实验中得到的时程数据与代入识别出的 k_{p} 、 k_{D} 并通过动力学模型仿真得到的时程数据, 动力学模型仿真计算中涉及的相关参数如表 1 所示.

表 1 动力学方程中各参数
Table 1 Parameters in the dynamic model

Parameters	Values	Parameters	Values
m_{t}/kg	0.424	q	7.5
m_{e}/kg	0.526	$\Delta\beta$	$\pi/3$
m_{w}/kg	0.284	η_-	0.3
l_{t}/m	0.220	η_+	2.6
l_{e}/m	0.197	η_{w}	0
l_{w}/m	0.097	$k/(\text{N/m})$	300

之后, 基于实验数据, 采用多项式回归方法分别建立 k_{p} 、 k_{D} 与舵机控制参数的定量映射关系. 回归模型可表述为:

$$k_{\text{p}} = -2.51 \times 10^6 + 1.94 \times 10^5 \alpha - 2.17 \times 10^4 \Delta t + 941.52 \alpha \Delta t - 5.56 \times 10^3 \alpha^2 + 495.38 \Delta t^2 - 10.60 \alpha \Delta t^2 - 14.78 \alpha^2 \Delta t + 70.48 \alpha^3 - 8.16 \Delta t^3 + 0.16 \alpha \Delta t^3 + 0.09 \alpha^3 \Delta t + 0.02 \alpha^2 \Delta t^2 - 0.34 \alpha^4$$

$$k_{\text{D}} = 2.69 \times 10^5 - 1.38 \times 10^3 \alpha - 368.51 \Delta t + 26.43 \alpha \Delta t + 22.02 \alpha^2 - 20.78 \Delta t^2 + 0.11 \alpha \Delta t^2 - 0.27 \alpha^2 \Delta t - 0.11 \alpha^3 + 0.30 \Delta t^3 \quad (7)$$

式中, α 为舵机旋转角度($^\circ$), Δt 为旋转间隔时间(ms), 上述定量关系如图 9 所示. 通过最小二乘法拟合得到的 k_{p} 、 k_{D} 与舵机参数的定量映射关系的决定系数(R-Square)分别为 0.9416 和 0.9470, 表明该回归模型具备良好的解释能力.

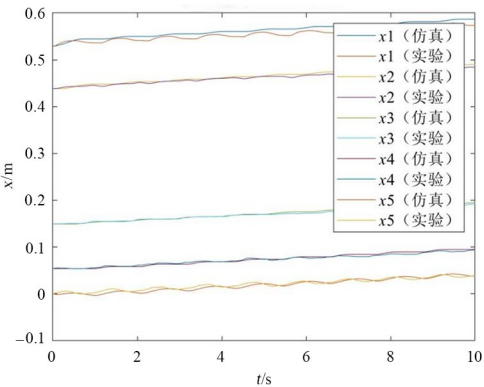


图 8 舵机参数为 51° 、 10 ms 时, 机器人地面爬行各单元仿真和实验时程图
Fig. 8 Simulation and experimental time history plot for each segment of the robot ground crawling with 51° and 10 ms servo parameters

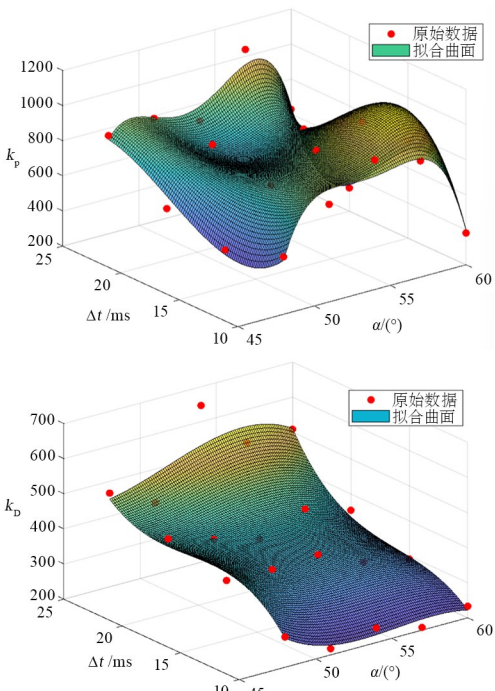


图 9 k_{p} 、 k_{D} 与舵机参数的定量映射关系图
Fig. 9 Quantitative mapping of k_{p} , k_{D} to the servo parameters

2.2 空中飞行模式双倾转涵道结构的动力学建模

在建立机器人飞行模式动力学模型的过程中, 遵循如下假设: 在变成 V 型结构后, 机器人可以被

视作关于 $O_b x_b z_b$ 、 $O_b y_b z_b$ 面对称的刚体,其几何中心及质心与机体坐标系的原点重合,所受阻力和重力始终保持不变.如图3,相关的坐标系有:地面惯性坐标系 $O_g x_g y_g z_g$ 、机体坐标系 $O_b x_b y_b z_b$.

$$\mathbf{R}_b^g = \mathbf{R}_\psi \mathbf{R}_\theta \mathbf{R}_\phi = \begin{bmatrix} \cos\theta \cos\phi & \cos\theta \sin\phi \sin\phi - \sin\theta \cos\phi & \cos\theta \sin\theta \cos\phi + \sin\theta \sin\phi \\ \cos\theta \sin\phi & \sin\theta \sin\phi \sin\phi + \cos\theta \cos\phi & \sin\theta \sin\theta \cos\phi - \cos\theta \sin\phi \\ -\sin\theta & \sin\phi \cos\theta & \cos\phi \cos\theta \end{bmatrix} \quad (8)$$

在机器人完成由直线型向V型的变形后,机器人可视为刚体.通过Newton-Euler方程描述机器人在平移和旋转运动时的运动规律.其中,刚体质心的平动由牛顿第二定律得出:

$$m\dot{\mathbf{v}}^g = \mathbf{G}^g + \mathbf{T}^g \\ = \mathbf{G}^g + \mathbf{R}_b^g \mathbf{T}^b \quad (9)$$

式中, $\mathbf{v}^g = [\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z}]^T$ 为地面坐标系下机器人的速度,可以通过传感器测得. $\mathbf{G} = [0 \ 0 \ mg]^T$ 为机身自重, \mathbf{T} 为机身左右两侧旋翼提供的拉力.上标 g 表示在地面惯性坐标系下,上标 b 表示在机体

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{1}{M_0} [T_y (\cos\psi \sin\theta \sin\phi - \sin\psi \cos\phi) + T_z (\cos\psi \sin\theta \cos\phi + \sin\psi \sin\phi)] \\ \ddot{y} = \frac{1}{M_0} [T_y (\sin\psi \sin\theta \sin\phi + \cos\psi \cos\phi) + T_z (\sin\psi \sin\theta \cos\phi - \cos\psi \sin\phi)] \\ \ddot{z} = \frac{1}{M_0} (T_y \sin\phi \cos\theta + T_z \cos\phi \cos\theta) - g \end{cases} \quad (11)$$

起飞时,机体坐标系与地面惯性坐标系方向一致,即 $\psi = \theta = \phi = 0$.两个控制涵道电机倾转的舵机没有倾转角度,即 $\delta_1 = \delta_2 = 0$.则根据式(11),当 $T_1 + T_2 \geq M_0 g$ 时, $\ddot{z} \geq 0$,即可达到起飞要求.

2.2.2 姿态动力学模型

由Euler方程可得机器人飞行模式的姿态动力学方程,其受到的合力矩可以表示为:

$$\mathbf{J}\dot{\boldsymbol{\omega}}^b + \boldsymbol{\omega}^b \times \mathbf{J}\boldsymbol{\omega}^b = \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\tau}_g + \boldsymbol{\tau}_p + \boldsymbol{\tau}_s \quad (12)$$

式中, $\boldsymbol{\omega}^b$ 为机体坐标系下的角速度, \mathbf{J} 为机器人的惯性张量, $\boldsymbol{\tau}$ 为涵道在机体坐标轴三个轴上产生的力矩, $\boldsymbol{\tau}_g$ 为涵道转动时产生的陀螺力矩, $\boldsymbol{\tau}_p$ 为涵道螺旋旋旋转时产生的反扭矩, $\boldsymbol{\tau}_s$ 为舵机作用产生的扭矩.根据对称性假设, \mathbf{J} 可以表示为

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$\boldsymbol{\tau}$ 可以表示为:

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (T_1 \sin\delta_1 + T_2 \sin\delta_2)h \\ (T_2 \cos\delta_2 - T_1 \cos\delta_1)d \\ (T_2 \sin\delta_2 - T_1 \sin\delta_1)d \end{bmatrix} \quad (14)$$

2.2.1 位置动力学模型

根据机体坐标系到地面惯性坐标系的欧拉角 ψ 、 θ 、 ϕ ,可以得到机体坐标系转换到地面惯性坐标系的变换矩阵:

坐标系下.

由双涵道倾转关系可以得到旋翼拉力 \mathbf{T}^b 可表示为:

$$\mathbf{T}^b = [T_x \ T_y \ T_z]^T \\ = [0 \ T_1 \sin\delta_1 + T_2 \sin\delta_2 \ T_1 \cos\delta_1 + T_2 \cos\delta_2]^T \quad (10)$$

式中, T_1 、 T_2 分别表示左、右涵道提供的拉力, δ_1 、 δ_2 分别表示左、右涵道倾转的角度.

把式(8)、式(10)代入式(9),可以得到机器人整体在地面惯性坐标系下的位置动力学模型:

式中, h 为涵道旋翼升力面距离机体重心的垂直高度, d 为轴向长度.

反向旋转的双旋翼(如图10)通过对称布局实现了角动量矢量和近似抵消,显著抑制了陀螺进动效应,同时旋翼倾转角速度远低于其高速旋转的转速,进一步弱化了陀螺耦合效应.其次,反向旋转的双旋翼气动扭矩在理想工况下自平衡,辅以涵道结构的整流优化和飞控系统的动态转速微调,残余扭矩被抑制至工程可忽略范围.此外,舵机低速准静态的倾转运动规划,其动态干扰远低于气动载荷.综合系统特性与主动控制策略的联合作用,使得 $\boldsymbol{\tau}_g$ 、 $\boldsymbol{\tau}_p$ 、 $\boldsymbol{\tau}_s$ 这三类力矩对机体姿态的影响被限制在飞行控制系统的鲁棒性容限内,在建模时进行简化处理.

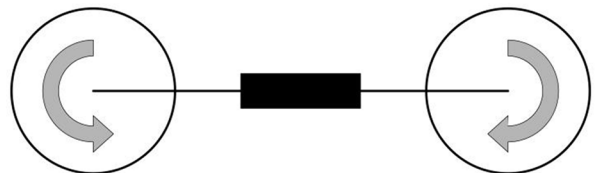


图10 涵道叶片旋转方向示意图(机体俯视方向)
Fig. 10 Schematic of duct blade rotation direction (robot top view)

机器人在地面坐标系下的角速度与在机体坐标系下的角速度的转换矩阵为:

$$\mathbf{R}_w = \begin{bmatrix} 1 & \tan\theta \sin\phi & \tan\theta \cos\phi \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \frac{\sin\phi}{\cos\theta} & \frac{\cos\phi}{\cos\theta} \end{bmatrix} \quad (15)$$

当机器人在实际飞行时,为了保证机身姿态可控性以及飞行系统的稳定性,俯仰角 θ 及滚转角 ϕ 通常都比较小,因此 \mathbf{R}_w 可以看作是单位矩阵,即

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_w \boldsymbol{\omega}^b = \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (16)$$

代入式(12),可以得到机器人的姿态动力学模型:

$$\begin{cases} \ddot{\phi} = \frac{1}{I_{xx}} [\tau_x + \dot{\theta} \dot{\psi} (I_{yy} - I_{zz})] \\ \ddot{\theta} = \frac{1}{I_{yy}} [\tau_y + \dot{\phi} \dot{\psi} (I_{zz} - I_{xx})] \\ \ddot{\psi} = \frac{1}{I_{zz}} [\tau_z + \dot{\phi} \dot{\theta} (I_{xx} - I_{yy})] \end{cases} \quad (17)$$

由上式可以看出,当机器人在飞行过程受到俯仰扰动时,涵道轴距垂直高度 h 越大,可产生的恢复力矩越大,从而使得机体稳定性提高. 针对文中设计的机器人,在飞行模式下会变成 V 型构型,使得 h 增加 218.4%,表明该设计的机体稳定性有所提高.

3 系统任务划分与实验验证

3.1 任务划分与模块化设计

机器人控制系统采用模块化架构设计,其系统组成如图 11 所示. 该架构通过多模块协同工作机制,实现了地面爬行模式、空中飞行模式及双模式切换功能的集成化控制. 系统核心由五大功能模块构成:

(1) 主控模块. 作为系统的核心处理单元,该模块集成机器人操作系统平台,负责协调各子系统间的数据交互. 其主要硬件配置包括 Arduino Nano 微控制器与 PCA9685 16 通道舵机驱动控制器,实现指令分发、数据融合及实时控制功能.

(2) 感知模块. 采用 MPU6050 六轴微机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)惯性测量单元,通过互补滤波算法实时采集三轴加速

度、三轴角速度等多维度运动参数,为运动控制提供姿态解算数据.

(3) 交互模块. 基于 HC-05 蓝牙芯片构建无线通信链路,采用自定义通信协议实现地面控制站与移动平台的远程指令传输与状态监控.

(4) 地面爬行模块. 采用恒等相位差驱动策略,通过舵机牵引鱼线控制仿蠕虫机构的爬行运动.

(5) 空中飞行模块. 集成电子调速器(electronic speed controller, ESC)与无刷直流电机,通过 PID 控制算法实现双涵道动力系统的推力矢量控制,配合舵机驱动的倾转机构完成飞行姿态调整.

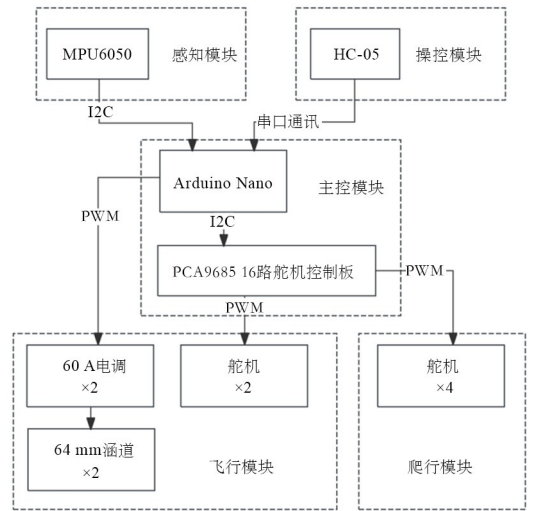


图 11 机器人控制系统模块

Fig. 11 Module of control system for robot

在模式切换过程中,系统根据控制指令动态重构执行策略:地面爬行模式下,主控制器通过脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)信号精确调控舵机转角,生成具有特定相位关系的仿生运动波形;飞行模式时,ESC 根据飞行控制律实时调整电机转速,同时舵机倾转机构对推进矢量进行动态优化. 各模块通过控制器局域网(controller area network, CAN)总线进行数据交互,确保多模式运动控制的实时性与可靠性.

飞行模式下采用的 PID 算法设计如图 12 所示. 用户通过交互模块发出角度期望值,与感知模块实时监测到的无人机俯仰/滚转角度做对比得到误差,通过 PID 算法处理该偏差值,并将其输出为两侧舵机倾转的角度以及涵道电机转速的改变量,机器人的涵道电机在给定油门的基础上叠加转速改变量输出实际转速. 机器人的俯仰姿态依靠倾转舵机控制,横滚姿态控制依靠涵道电机差速控制.

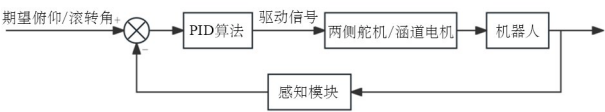


图 12 俯仰/滚转控制 PID 算法原理图
Fig. 12 PID algorithm schematic of pitch control

3.2 实验验证

参照前文给出的机器人结构及相关元器件选型,搭建无人机关体模型,如图 13 所示. 整机质量为 1.9 kg,两个涵道一共可以提供的最大升力为 40.57 N.

根据控制原理编写空地双模式仿蠕虫移动机器人的地面爬行和空中飞行控制程序,下载到机身搭载的 Arduino Nano 系统板中,通过机器人机身上搭载蓝牙通信模块 HC-05,遥控机器人进行简单的管道爬行和空中飞行测试,并将机器人执行任务时传感器 MPU6050 采集或生成的数据实时发送给电脑的上位机,可以在上位机中观测机器人在执行各样任务时的数据变化.

图 14 为机器人在管道中爬行的实时情况. 爬行速度最大为 7.7 mm/s,具体实验参数为舵机转动最大角度为 60°,每 1°转动间隔 10 ms.

图 15 为出管道后,机器人通过两侧涵道提供的升力将蠕虫单元抬起,与中间的控制平台呈一定的夹角,从直线型变到 V 型,以及在空中悬停的过程. 空中飞行模式下,姿态角的波动范围为±8°.

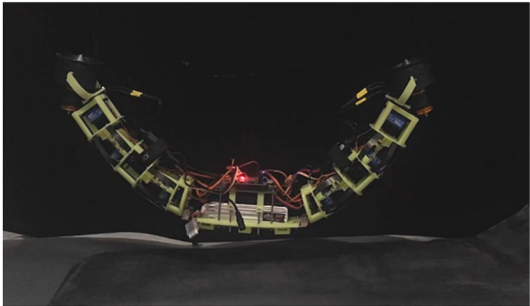


图 15 机器人飞行过程
Fig. 15 Robot in flight

4 结论

本文针对传统仿蠕虫移动机器人在开阔地形中机动能力不足的局限性,提出了一种融合地面仿生蠕动与空中飞行功能的双模式机器人. 通过结构与控制系统设计,取得了以下研究成果:

(1)仿蠕虫单元创新设计. 采用弹簧钢片与伺服电机驱动鱼线模拟蚯蚓环向与纵向肌肉的拮抗作用,结合链式旋转限位机构,单个单元收缩/伸展变形量达 13.9%,使其能在直径受限的管道内完成爬行任务. 除此之外,通过动力学建模得到实验控制参数与模型仿真参数的定量关系.

(2)双倾转涵道飞行系统. 通过横列式双涵道布局与 V 型构型切换,飞行模式下涵道轴距垂直高度提升 218.4%,显著增强飞行稳定性. 涵道系统最大升力为 40.57 N,整机总质量控制 在 2 kg 以内,满足垂直起降需求.

(3)模块化协同控制架构. 集成地面蠕动的质量—刚度—阻尼模型与飞行模式的 Newton-Euler 动力学模型,提出基于 PID 算法的推力矢量调节策略,验证了双模式切换与稳定飞行的可行性.

然而,研究仍存在以下待优化方向:



图 13 装配完的样机实物图
Fig. 13 Assembled prototype



图 14 机器人在管道中爬行
Fig. 14 Robot crawling through a pipe

- (1)柔性结构动态形变对飞行姿态的耦合影响需进一步量化分析;
 - (2)双模式协同控制的实时性及复杂地形适应性需通过更广泛的场景测试验证;
 - (3)能源效率与续航能力的提升是未来小型化与实用化的重要挑战.
- 后续研究可结合智能材料优化仿生单元驱动效率,以拓展其在灾害救援、管道检测等复杂场景中的应用潜力.

参考文献

[1] GU G Y, ZOU J, ZHAO R K, et al. Soft wall-climbing robots [J]. *Science Robotics*, 2018, 3(25): eaat2874.

[2] KALANTARI A, SPENKO M. Modeling and performance assessment of the HyTAQ, a hybrid terrestrial/aerial quadrotor [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2014, 30(5): 1278—1285.

[3] KALANTARI A, TOUMA T, KIM L, et al. Drivocopter: a concept hybrid aerial/ground vehicle for long-endurance mobility [C]//2020 IEEE Aerospace Conference. New York: IEEE, 2020.

[4] GEFEN E, ZARROUK D. Flying STAR2, a hybrid flying driving robot with a clutch mechanism and energy optimization algorithm [J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 115491—115502.

[5] AGUILAR J, ZHANG T N, QIAN F F, et al. A review on locomotion robophysics: the study of movement at the intersection of robotics, soft matter and dynamical systems [J]. *Reports on Progress in Physics*, 2016, 79(11): 110001.

[6] FANG H B, WANG C H, LI S Y, et al. A comprehensive study on the locomotion characteristics of a metameric earthworm-like robot [J]. *Multi-body System Dynamics*, 2015, 35(2): 153—177.

[7] 黎亮, 章定国. 柔性机器人刚柔耦合和大变形动力学问题[J]. *动力学与控制学报*, 2025, 23(1): 94.

LI L, ZHANG D G. The dynamic challenges of rigid-flexible coupling and large deformation mechanics in compliant robotic systems [J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2025, 23(1): 94. (in Chinese)

[8] 许和勇, 叶正寅. 涵道螺旋桨与孤立螺旋桨气动特性的数值模拟对比[J]. *航空动力学报*, 2011, 26(12): 2820—2825.

XU H Y, YE Z Y. Numerical simulation and comparison of aerodynamic characteristics between ducted and isolated propellers [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2011, 26(12): 2820—2825. (in Chinese)

[9] 艾之淦, 王康昊, 刘晓峰. 基于数据驱动的平面铰接多刚体系统动力学建模[J]. *动力学与控制学报*, 2025, 23(2): 55—63.

AI Z H, WANG K H, LIU X F. Dynamic modeling of planar articulated multi-rigid body systems based on data drive [J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2025, 23(2): 55—63. (in Chinese)

[10] 孙齐. 结构动力学基本概念理解与工程实践运用[J]. *动力学与控制学报*, 2024, 22(11): 91—96.

SUN Q. Understanding of basic concepts of structural dynamics and application in engineering practice [J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2024, 22(11): 91—96. (in Chinese)