

文章编号 1004-924X(2019)10-2199-08

非线性反馈和二次型调节器在两栖机器人中的应用

郑 亮^{1,2}, 朴 燕^{1*}, 马宇科²

(1. 长春理工大学 电子信息工程学院, 吉林 长春 130022;

2. 吉林农业科技学院 电气与信息工程学院, 吉林 吉林 132101)

摘要:球形两栖机器人具有对称的结构和多自由度的运动状态特性, 在环境适应性和运动稳定性上具有优势。本文介绍一种可以用于深海水下探测与救援的新型水陆两栖机器人控制系统的结构和建模方法, 根据机器人的运动控制模式, 推导出具有 6 个自由度的动态数学模型, 并在动态模型的基础上, 建立并评估了两种控制模型。第一种是基于二次型调节器(LQR)的控制器模型, 第二种是基于非线性状态反馈(FL)的控制器模型。最后对两种控制模型进行水下实验验证及评估, 从而证明两种控制器的有效性和优劣性。实验表明: 非线性状态反馈系统在响应时间(LQR=67.5 s, FL=46.5 s)方面都优于有限时域 LQR 控制器, 而 LQR 控制器在上升时间(LQR=24.5 s, FL=39.8 s)方面更加具有优势。

关键词:球形机器人; 两栖; 水下探测; 非线性反馈; 二次型调节器

中图分类号: TP242 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20192710.2199

Application of nonlinear feedback and quadratic regulators in amphibious robots

ZHENG Liang^{1,2}, PIAO Yan^{1*}, MA Yu-ke²

(1. Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. School of Electrical and Information Engineering,

Jilin Agricultural Science and Technology University, Jilin 132101, China)

* Corresponding author, E-mail: piaoyan66@126.com

Abstract: Amphibious Spherical Robots (ASRs) possess high environmental adaptability and high motion stability owing to their symmetrical structural characteristics and multiple degrees of freedom in motion. This paper proposes a novel ASR control system that can be used in underwater detection and rescue and discusses its structure and modeling method. Depending on the motion control model of the robot, it can enable a dynamics system with 6 Degrees of Freedom (DOF). The mathematical model, based on the dynamic model, establishes and evaluates two versions of the control system. One is a controller model based on a Linear Quadratic Regulator (LQR) and the other is a motion equation of a control system based on nonlinear state Feedback Linearization (FL). Underwater control experiments were carried out on both control systems to prove their effectiveness and advantages. The experiments showed that the nonlinear state feedback system is superior to the finite

收稿日期: 2019-06-06; 修订日期: 2019-07-19.

基金项目: 吉林农业科技学院大学生科技创新创业训练计划项目(No. 201911439027); 吉林农业科技学院青年基金资助项目(No. 20190505)

time domain LQR controller in terms of corresponding durations of operation (LQR = 67.5 s, FL = 46.5 s) and fall times (LQR = 24.5 s, FL = 39.8 s).

Key words: spherical robot; amphibious; underwater detection; nonlinear feedback; quadratic regulator

1 引言

最早机器人的概念是在科幻作品中出现,“机器人”这一名词来自于剧作家 Karel Capek 1920 年的戏剧《Rossum's Universal Robots》。机器人控制技术是随着互联网和传感器等技术发展而产生的一种新型控制技术,欧美发达国家为满足军事和生活的需要开发了很多智能化程度高、应用领域广、操作灵活的机器人。但在一些特殊的应用环境下,例如两栖侦察、海底探测、深海探测等相关领域,一般性能的机器人无法满足要求,所以两栖机器人应运而生。两栖机器人具有特殊的灵活性、超强的适应能力、便于投放和回收等优越特性,可以独立在水下完成侦查、搜救、探测、数据收集等工作^[1]。因此,两栖球形机器人很自然地成为人类延伸自己感知能力的主要工具之一。

两栖机器人控制技术在国内外发展迅速,北京理工大学郭书祥团队研究的两栖球形机器人是以球形为主体的机器人,整体结构分为上半球和下半球,它在陆地模式时,下半球可以折叠到上半球,用 4 个由 8 个舵机组成的机械臂行走^[2];在水下模式的时候,折叠的上半球通过二个舵机封闭下半球,由喷水电机推进行走,球体内部也安装了通信和稳定控制模块,从而实现了球形机器人的基本功能。北京邮电大学孙汉旭团队研究的球形机器人以摩擦力为驱动力,没有被动摩擦力,该机器人具有运动效率高,对路面要求低,适应能力强等优点^[3-4]。哈尔滨工程大学叶秀芬团队对基于喷水推进的微小球形水下潜器进行了深入的研究^[5]。

在国外,日本香川大学提出了一种基于异丙基氯化汞 (IPMC) 的球形子母机器人的设计理念,该球形机器人可以潜入水下并释放 IPMC 材料的子机器人,完成探测狭小水下地域的任务^[6-9]。美国康妮狄格州研发的军用两栖机器人 (GuardBot),使用九轴稳定器,利用 D-H 算法实现对机器人的控制。

虽然国内外对两栖球形机器人都进行了深入的研究,但在水下复杂环境下(能见度、水密度、杂

质)实现对球形机器人的高稳定性和多自由度的控制仍是亟待解决的难题。本文从机器人的实际运动模式出发,提出一种用非线性算法和二次型调节器控制相对比的控制理论,使球形两栖机器人具有更高的稳定性和灵活性,并实现了零度转弯半径的高机动性球形两栖机器人,经过对算法的评估和水下实验验证,结合机器人本身结构的特性,得到最优的控制效果。

2 两栖机器人工作原理

图 1 为两栖球形机器人原理图,球体设计基于完全对称性的原则。球形两栖机器人的直径为 260 mm,其结构包括麦克纳姆轮传动装置、上浮下潜控制装置、传感器控制平台、模块工作仓和无线供电装置五部分。

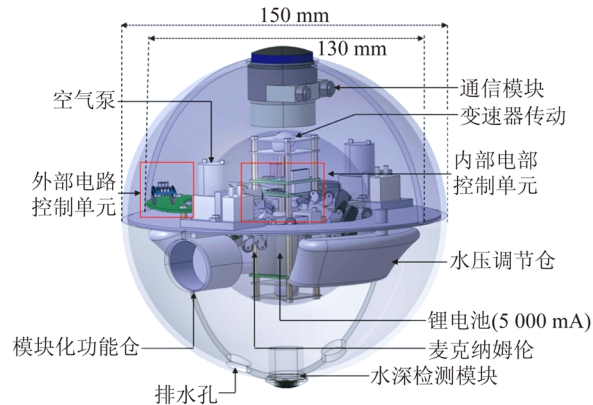


图 1 球形两栖机器人的机械结构原理

Fig. 1 Principle of amphibious spherical robot

2.1 传送装置设计

麦克纳姆轮是一种万向轮,如图 2 所示,利用麦克纳姆轮的多方向性,在不使用转向电机的情况下,球型机器人实现了球壳全向转动,再配合合理重量的电池配重使内部的动力始终保持相对地面静止的效果,再通过麦克纳姆轮的轮胎摩擦力使球壳相对于内部动力块运动,驱动球壳相对于地面运动,从而达到移动的效果。同时,在水中的移动也可以利用旋转外壳与水的摩擦力前进。由于麦克纳姆轮的轮子不能在崎岖的路面上持久行驶,持久行驶会导致轮子结构损坏,如果使用球壳

传动设计,即使在崎岖的路面上长时间行驶,也不会损伤麦克纳姆轮,所以这种设计屏蔽了麦克纳姆轮易损坏的缺点,同时保留了麦克纳姆轮的全向性特点。本设计的优点可以利用球形机器人的密封性,达到良好的防水目的,并有效保护内部的控制装置,使机器人在灰尘及水下的环境下都可以稳定运行。

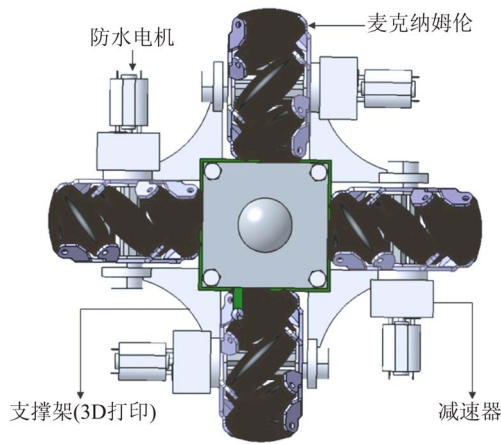


图 2 麦克纳姆轮转动装置

Fig. 2 Configuration of Mecanum wheel transmission

2.2 水中自由度控制

机器人在水中运动,横向和纵向控制利用纳姆轮滚动产生的反向摩擦力,但上浮下潜需要设计排水装置,所以上浮下潜部分由上下两个储气仓构成,上部没有安置排水孔,下部设计有两个排水孔。气室上下保持对称的结构,可以起到在水中保持平衡的作用。如图 3 所示,气泵作为气体移动工具,搭配排水孔,利用了气球的弹力,在上浮的时候气泵正转,将上部气室气球中的气体抽到下部气室,使整个球体排开水的体积增加。根据阿基米得浮力原理,物体在水中的浮力取决于物体排开水的体积,当浮力大于重力的时候球体就能上浮。同理,下潜时把下部气室中的气体抽入上部气室,使重力大于浮力,机器人即实现下潜功能。

2.3 检测控制系统

传感器部分采用了声呐传感器、无线射频传感器、水压水深传感器、六轴姿态传感器及图像捕捉传感器。声呐模块可以进行水中通信,同时可以在水中探测障碍物,并且提前绕行。六轴姿态传感器可以检测自身的姿态从而通过动力模块做出调整。水深水压传感器可以通过检测水压来检

测水中深度。视频采集传感器可以实时监测移动目标的位置,完成搜寻和营救的任务。

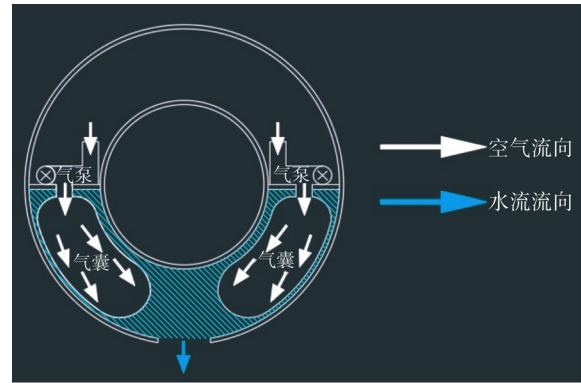


图 3 机器人上浮和下潜原理

Fig. 3 Schematic of robot floating and diving

2.4 模块化工作仓

在球形机器人的左右两侧各预留了一个模块化工作仓,可以根据任务的需求配置不同的工作模块,例如机械臂、水下摄像机、救援物品投放器和小型机器人等。

2.5 供电单元

在设计过程中,考虑到续航的重要性,在每一块电路板及电池上面都加上了无线供电设备,使球形机器人在不打开盖子的情况下实现充电功能,方便维护,同时大幅减少了内部线缆布线的复杂度。

3 控制算法

3.1 动态建模

由于球形两栖机器人主要在水下工作,所以需要建立带有参考点的运动控制方程。

如图 4 所示,世界参考坐标系原点在标准正交基坐标为 $\{X_n, Y_n, Z_n\}$,是参考坐标系的原点。球的实际位置在世界参考系中的坐标是 $\{X_b, Y_b, Z_b\}$,所以可以推导出运动方程为:

$$\eta = \begin{bmatrix} P_{b/n}^n \\ \Theta_{nb} \end{bmatrix} = [x, y, z, \varphi, \theta, \psi]^T, \quad (1)$$

$$J_\theta(\eta) = \begin{bmatrix} R_b^n(\Theta_{nb}) & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & R_\theta(\Theta_{nb}) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$v = \begin{bmatrix} v_n^b \\ \omega_n^b \end{bmatrix} = [u, v, w, p, q, r]^T, \quad (3)$$

$$\tau = \begin{bmatrix} f_b^b \\ m_b^b \end{bmatrix} = [X, Y, Z, K, M, N]^T, \quad (4)$$

其中: $\boldsymbol{\eta} \in \mathbb{R}^3 \times \mathbb{S}^3$, 表示机器人在世界参考坐标系中的位置方向向量。在公式(1)中, $\mathbf{P}_{b_n}^a \in \mathbb{R}^3$ 是机器人 O_b 位置相对 O_a 的位置矢量, $\boldsymbol{\Theta}_{mb} \in \mathbb{S}^5$ 是机器人运动到 O_b 点的欧拉角矢量, 包括滚动角、俯仰角和偏航角。在公式(2)中, $\mathbf{J}_\theta(\boldsymbol{\eta})$ 是一个 6×6 的雅可比矩阵, 主要表达机器人运动过程中线速度的变化, $T_\theta(\boldsymbol{\Theta}_{mb})$ 表示角速度的变化。在公式(3)中, $\mathbf{v} \in \mathbb{R}^6$ 是线速度 $v_{b_n}^b$ 和角速度 $\omega_{b_n}^b$ 在参考坐标系的矢量。在公式(4)中, $\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^6$ 表示在机器人本身坐标系中质量 m_b^b 和力矩 f_b^b 的过度矩阵。

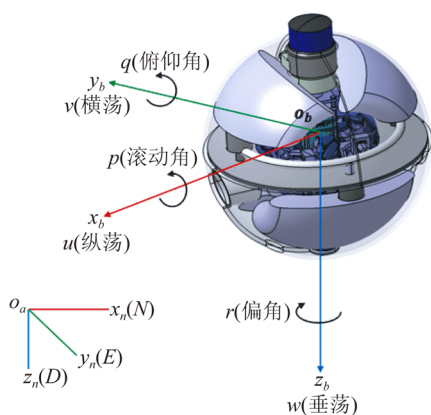


图 4 机器人参考系和运动方程

Fig. 4 Reference coordinate and motion equations of amphibious robots

$$\mathbf{R}_b^a(\mathbf{Q}_{mb}) = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & -\sin \psi \cos \varphi + \cos \psi \sin \theta \sin \varphi & \sin \psi \sin \varphi + \cos \psi \cos \varphi \sin \theta \\ \sin \psi \cos \theta & -\cos \psi \cos \varphi + \sin \psi \sin \theta \sin \varphi & -\cos \psi \sin \varphi + \sin \psi \cos \varphi \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \varphi & \cos \theta \sin \varphi \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$\mathbf{T}_\theta(\boldsymbol{\Theta}_{mb}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin \theta \\ 0 & \cos \varphi & \cos \theta \sin \varphi \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \theta \cos \varphi \end{bmatrix}. \quad (11)$$

以上方程实现的前提是机器人围绕惯性轴旋转, 则可以使用欧拉角描述机器人姿态, 因为以上运动方程参数保留机器人姿态的物理意义, 所以该方程适用于机器人的任何姿态。但如果机器人的俯仰角 θ 为 $\pm 90^\circ$ 时, 该方程失去控制意义, 因为机器人上浮依靠排水舱浮力实现, 俯仰角 $\theta = \pm 90^\circ$, 为了使方程满足完整的运动范围, 引入四元参数化方程:

$$\mathbf{J}_q(\boldsymbol{\eta}) = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_b^a(q) & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{T}_q(q) \end{bmatrix}, \quad (12)$$

其中:

3.2 非线性 6 自由度控制

多自由度使机器人在水中的运动非常灵活, 尤其是非线性运动状态, 需要把非线性模型转化为线性模型, 建模方程如下:

$$\boldsymbol{\eta} = \mathbf{J}_Q(\boldsymbol{\eta}) \mathbf{v}, \quad (5)$$

$$\mathbf{M}\mathbf{v} + \mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \mathbf{B}\boldsymbol{\tau}, \quad (6)$$

其中:

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_{RB} + \mathbf{M}_A, \mathbf{M} = \mathbf{M}^T > 0, \quad (7)$$

$$\mathbf{C}(\mathbf{v}) = \mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v}) + \mathbf{C}_A(\mathbf{v}), \quad (8)$$

$$\mathbf{D}(\mathbf{v}) = \mathbf{D} + \mathbf{D}_n(\mathbf{v}), \quad (9)$$

其中: $\mathbf{B}\boldsymbol{\tau}$ 是机器人推进器的映射矩阵, $\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})$ 是作用在机器人上重力和浮力的静水压力和力矩, 系统惯性矩阵 \mathbf{M} 是由刚体惯性力矩 \mathbf{M}_{RB} 和附加质量 \mathbf{M}_A 的流体动力惯性矩阵组成的正半定矩阵。科里奥利力和向心力矩阵 $\mathbf{C}(\mathbf{v})$ 是由刚体动力学 $\mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v})$ 和流体动力学 $\mathbf{C}_A(\mathbf{v})$ 组成, 最后, 由公式(9), 总流体动力阻尼矩阵 $\mathbf{D}(\mathbf{v})$ 是由线性项 \mathbf{D} 和非线性项 $\mathbf{D}_n(\mathbf{v})$ 之和。

3.3 四元化运动方程

如图 4 所示, 任何状态下, 根据公式(2), 机器人从 O_a 移动到 O_b 的状态转移矩阵是 $\mathbf{J}_\theta(\boldsymbol{\eta})$, $\mathbf{J}_\theta(\boldsymbol{\eta})$ 又包含两个矩阵 $\mathbf{R}_b^a(\boldsymbol{\Theta}_{mb})$ 和 $\mathbf{T}_\theta(\boldsymbol{\Theta}_{mb})$, 通过围绕三个轴的三个旋转角实现变换, 方程如下:

$$\mathbf{R}_b^a(q) = \begin{bmatrix} 1 - 2(q_2^2 + q_3^2) & 2(q_1 q_2 - q_3 q_0) & 2(q_1 q_3 + q_2 q_0) \\ 2(q_1 q_2 - q_3 q_0) & 1 - 2(q_1^2 + q_3^2) & 2(q_2 q_3 - q_1 q_0) \\ 2(q_1 q_3 + q_2 q_0) & 2(q_2 q_3 - q_1 q_0) & 1 - 2(q_1^2 + q_2^2) \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$\mathbf{T}_q(q) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -q_1 & -q_2 & -q_3 \\ q_0 & -q_3 & q_2 \\ q_3 & q_0 & -q_1 \\ q_2 & q_1 & q_0 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

由方程(14)得知, 用于四元数方程的符号为 $[q_0 \ q_1 \ q_2 \ q_3]$, 其中, q_0 表示四元数的标量分量, 此外, 四元数参数也可以用来描述静水力矢量和力矩矢量。

$$g(\boldsymbol{\eta}) = \begin{bmatrix} 2q_c(W-B) \\ 2q_d(W-B) \\ -q_b(y_g W - y_b B) - 2q_d(z_g W - z_b B) \\ -q_b(x_g W - x_b B) - 2q_c(z_g W - z_b B) \\ -2q_d(y_g W - y_b B) - 2q_c(y_g W - y_b B) \end{bmatrix}, \quad (15)$$

其中:

$$\begin{aligned} q_b &= -q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 - q_3^2, \\ q_c &= q_0 q_2 - q_1 q_3, q_d = q_0 q_1 - q_2 q_3, \\ \mathbf{W} &= mg, \mathbf{B} = \rho g \Delta. \end{aligned}$$

4 位置控制

4.1 水平线性二次型调节器

基于多变量方法,选择线性二次型(Linear Quadratic,LQ),LQ 调节器通过最小化性能指标解决控制问题^[10-11]:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} [(\mathbf{x} - \mathbf{x}_R)^T \mathbf{Q}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_R) + (\mathbf{u} - \mathbf{u}_R)^T \mathbf{R}(\mathbf{u} - \mathbf{u}_R)] dt, \quad (16)$$

其中: \mathbf{x} 是状态向量, \mathbf{x}_R 是参考状态向量, \mathbf{u} 是输入向量, \mathbf{u}_R 为输入参考向量, \mathbf{Q} , \mathbf{R} 分别是状态和输入的过度矩阵。如图 5 所示,控制系统由两个相互嵌套的闭环控制构成,内环是速度控制,外环是位置控制。 k_0 和 k_1 是 LQ 控制的两个独立的增益变量。根据公式(12),LQ 控制器的状态增益是对角矩阵,所以在主对角线上每项被归一化矩阵 \mathbf{Q} ,如公式(17)所示^[12-14]:

$$q_i = \left[\frac{1}{\max error_i} \right]^2. \quad (17)$$

通过调整动态系统的参数 \mathbf{R} ,从而选择响应时间和所需控制力之间的参数关系,在实际验证中逐步调整参数 \mathbf{R} 的值。

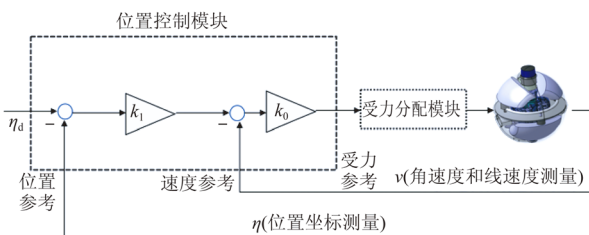


图 5 线性二次型调节器控制结构

Fig. 5 Architecture of linear quadratic regulator control

4.2 非线性状态反馈控制

非线性状态反馈控制的基本方法就是将非线性的动力学模型通过算法转换成一组独立的积分链条,如下所示^[15-16]:

$$\ddot{\boldsymbol{\eta}} = \boldsymbol{\lambda}^n, \quad (18)$$

$$\dot{\boldsymbol{v}} = \boldsymbol{\lambda}^b, \quad (19)$$

其中 $\boldsymbol{\lambda}^n$ 和 $\boldsymbol{\lambda}^b$ 分别为加速度和加速度矢量。

如图 6 所示,在控制器中, $\boldsymbol{\eta}$ 和 \boldsymbol{v} 可以通过传感器得到,即:

$$n(\boldsymbol{v}, \boldsymbol{\eta}) = \mathbf{C}(\boldsymbol{v}) \boldsymbol{v} + \mathbf{C}(\boldsymbol{v}) \boldsymbol{v} + g(\boldsymbol{\eta}). \quad (20)$$

建立控制模型用来抵消系统动力学的非线性,得到:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{M} \boldsymbol{\lambda}^b + n(\boldsymbol{v}, \boldsymbol{\eta}). \quad (21)$$

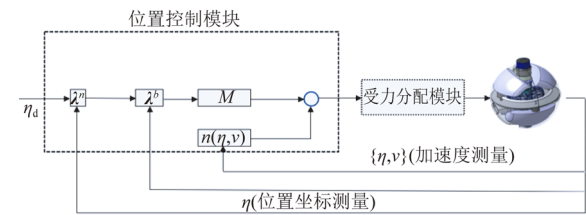


图 6 状态反馈线性控制器控制结构

Fig. 6 Architecture of state feedback linearization controller

5 测量实验与结果

5.1 机器人基本参数测定

机器人运动时,需要通过传感器实时采集机器人的运动状态参数,完成建模基本参数的计算。陀螺平衡模块用来控制机器人的线性运动状态,通过实时采集仰俯角、滚动角和偏角,调节推进器的运行时间和运动方向,达到稳定控制的目的。

垂荡、横荡和纵荡通过初始状态于当前状态的传递矩阵得到。为验证机器人在陆地上的运动特性,本文设计了稳定性测试实验,如图 7 所示,测试长度为 320 cm,在 0~15 s 内,机器人发生两次偏角变化,当偏角大于 20°,机器人触发稳定控制系统使机器人回到中心位置,如图 8 所示。机器人偏角变化如图 9 所示。



图 7 稳定控制实验测试环境

Fig. 7 Experimental set-up of stability control system

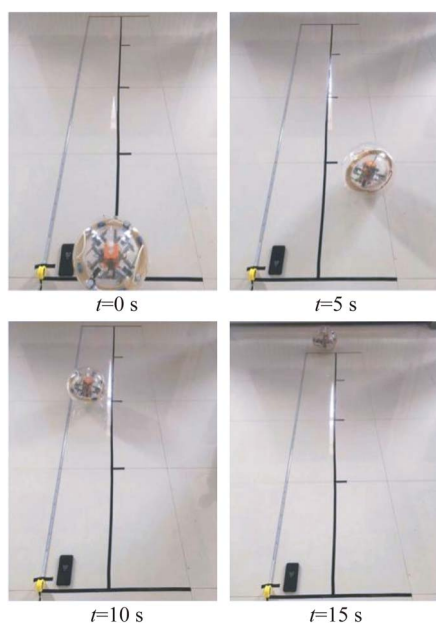


图 8 机器人稳定控制运动轨迹

Fig. 8 Motion trajectories for robot stability control

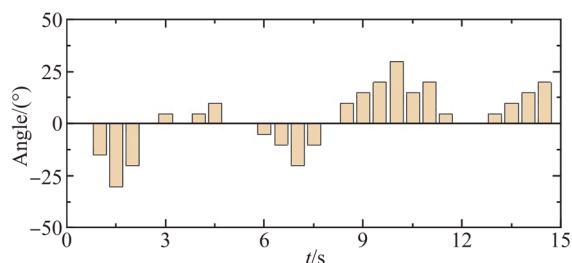


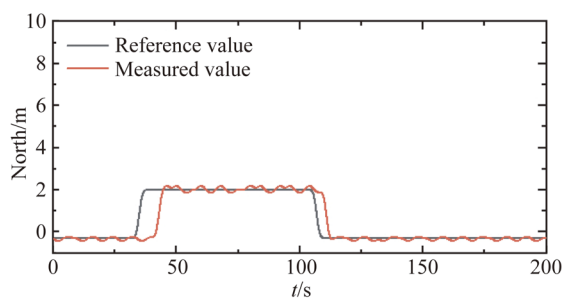
图 9 稳定控制下机器人偏角变化

Fig. 9 Deflection change under stability trajectory

5.2 路径跟踪 LQR 控制实验

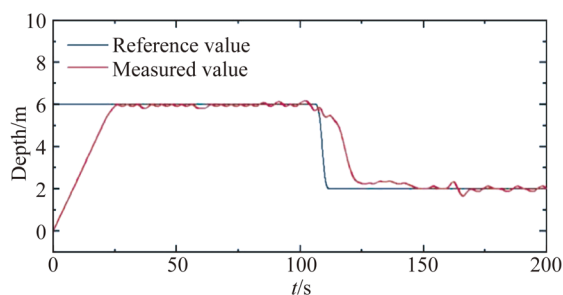
在 4.1 中阐述的 LQR 控制系统, 根据 LQR 的动态模型, 在测试实验中, 设置初始测试中俯仰

角固定为 0° , 假设动态模型没有奇点, 由传感器采集欧拉角参数。球形机器人的质量为 m , 质心固定不变。根据控制器在模拟环境中设定的参数进行实验, 根据实验结果对参数进行调整, 实验结果如图 10 所示。



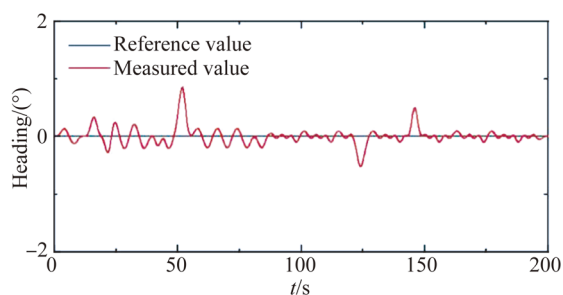
(a) 垂荡测量结果

(a) North measurements



(b) 横荡测量结果

(b) Depth measurements



(c) 偏角变化曲线

(c) Heading measurements

图 10 LQR 控制器实验结果

Fig. 10 Experimental results obtained with LQR controller

5.3 非线性状态反馈实验

非线性状态反馈控制器的增益通过极点放置算法获得。在最初的模拟环境中导出系统的动态模型进行调整, 测得垂荡、横荡、偏角和速度值, 如图 11 和表 1 所示。

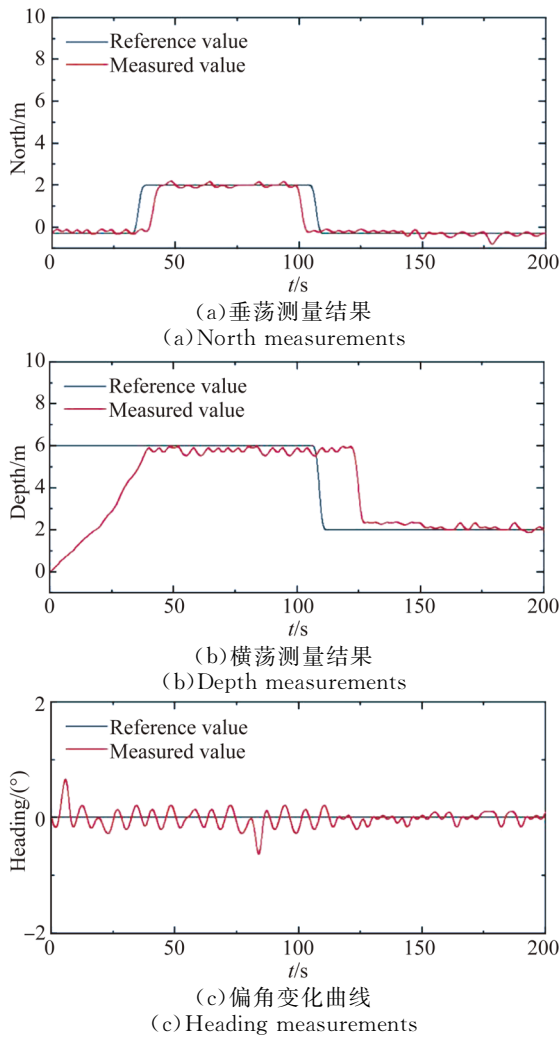


图 11 非线性 FL 控制器实验结果
Fig. 11 Experimental results obtained with FL controller

参考文献:

[1] 袁飞. 线性二次型球式滚动机器人运动稳定性研究与测试分析[J]. 中国工程机械学报, 2018, 16(5): 462-466, 470.
YUAN F. Kinematic stability and test analysis of ball rolling robot on linear quadratic regulator [J]. *Chinese Journal of Construction Machinery*, 2018, 16(5): 462-466, 470. (in Chinese)

[2] 郭书祥, 孙珊, 郭健. 新型仿生水下子母机器人系统设计[J]. 控制与决策, 2019, 34(5): 1004-1010.
GUO SH X, SUN SH, GUO J. Design of a novel biomimetic underwater mother-son robot system [J]. *Control and Decision*, 2019, 34(5): 1004-1010. (in Chinese)

[3] 李艳生, 杨美美, 孙汉旭, 等. 一种摆式球形机器人水中俯仰运动的稳定控制方法[J]. 振动与冲击,

表 1 速度测量结果

Tab. 1 Result of velocity measurement (m · s⁻¹)

速度	LQR	FL
向前	0.18	0.21
向后	-0.19	-0.29
向下	0.18	0.12
向上	-0.18	-0.08

6 结 论

本文提出了 LQR 和 FL 两种控制系统,详细介绍了两种控制系统的模型和工作原理,根据反馈状态的流程图给出控制所涉及的算法。最后,通过实验给出了垂荡、横荡、偏角和速度的变化曲线和数据。实验结果表明,FL 控制器比 LQR 控制器在垂荡相应速度快 21 s,而 LQR 控制器比 FL 控制器在横荡稳态时间上要快 15.3 s;在偏角稳定控制上,LQR 最大偏角达到 1.09°,而 FL 最大偏角为 0.8°。在速度控制上,FL 控制器在向前和向后两个状态下的速度更快,而 LQR 控制器在向下和向上两个状态下的速度比 FL 控制器更加具有优势。

2018, 37(13): 149-154, 189.
LI Y SH, YANG M M, SUN H X, *et al.*. A stability control method for pitching motion in water of a pendulum type spherical robot [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(13): 149-154, 189. (in Chinese)

[4] 于涛, 孙汉旭, 赵伟, 等. 一种球形滚动机器人的路径跟踪控制器设计[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(3): 91-96.
YU T, SUN H X, ZHAO W, *et al.*. Design of a path following controller for a spherical rolling robot [J]. *Computer Measurement & Control*, 2019, 27(3): 91-96. (in Chinese)

[5] 杨红彪. 水下球形机器人的关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
YANG H B. *Research on the Key Technologies of the Underwater Spherical Robot* [D]. Harbin:

- Harbin Engineering University, 2018. (in Chinese)
- [6] ZHENG L, GUO S X, GU S X. The communication and stability evaluation of amphibious spherical robots [J]. *Microsystem Technologies*, 2019, 25(7): 2625-2636.
- [7] ZHENG L, GUO S X, GU S X. Structure improvement and stability for an amphibious spherical robot [C]//2018 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), August 5-8, 2018. Changchun. New York, USA: IEEE, 2018.
- [8] GU S X, GUO S X. Performance evaluation of a novel propulsion system for the spherical underwater robot (SURIII) [J]. *Applied Sciences*, 2017, 7(11): 1196.
- [9] LI M X, GUO S X, GUO J, *et al.*. Development of a biomimetic underwater microrobot for a father-son robot system [J]. *Microsystem Technologies*, 2017, 23(4): 849-861.
- [10] 郭立新, 陈从根, 赵琳. 座椅悬架和汽车悬架的集成变增益 LQR 控制[J]. *东北大学学报: 自然科学版*, 2019, 40(3): 398-402, 408.
GUO L X, CHEN C G, ZHAO L. Integrated variable gain LQR control of seat suspension and automobile suspension [J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 2019, 40(3): 398-402, 408. (in Chinese)
- [11] 蔡春山, 王佐勋. 基于 LQR 的两轮机器人的平衡控制[J]. *齐鲁工业大学学报*, 2018, 32(1): 55-60.
CAI CH SH, WANG Z X. Balance control of two-wheeled robot based on LQR [J]. *Journal of Qilu University of Technology*, 2018, 32(1): 55-60. (in Chinese)
- [12] 徐振邦, 赵智远, 贺帅, 等. 机器人工作空间求解的蒙特卡洛法改进和体积求取[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(11): 2703-2713.
XU ZH B, ZHAO ZH Y, HE SH, *et al.*. Improvement of Monte Carlo method for robot workspace solution and volume calculation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(11): 2703-2713. (in Chinese)
- [13] 党选举, 王凯利, 姜辉, 等. 工业机器人谐波减速器迟滞特性的神经网络建模[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(3): 694-701.
DANG X J, WANG K L, JIANG H, *et al.*. Neural network modeling of hysteresis for harmonic drive in industrial robots [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(3): 694-701. (in Chinese)
- [14] 季超, 桑胜波, 张强, 等. 基于纳米材料的柔性应力传感器研究进展[J]. *化工新型材料*, 2018, 46(12): 1-5.
JI CH, SANG SH B, ZHANG Q, *et al.*. Research progress of flexible strain sensor based on nanomaterial [J]. *New Chemical Materials*, 2018, 46(12): 1-5. (in Chinese)
- [15] 曹天扬, 蔡浩原, 方东明, 等. 结合图像内容匹配的机器人视觉导航定位与全局地图构建系统[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(8): 2221-2232.
CAO T Y, CAI H Y, FANG D M, *et al.*. Robot vision system for keyframe global map establishment and robot localization based on graphic content matching [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(8): 2221-2232. (in Chinese)
- [16] 胡瑞钦, 隆昌宇, 张立建. 视觉与力觉结合的卫星部件机器人装配[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(10): 2504-2515.
HU R Q, LONG CH Y, ZHANG L J. Robotic assembly technology for satellite components based on visual and force information [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(10): 2504-2515. (in Chinese)

作者简介:



郑亮(1982-),男,吉林省吉林市人,博士研究生,讲师,2006年、2010年于长春理工大学分别获得学士、硕士学位,主要从事机器人控制学、水下机器人建模与仿真系统的研究。E-mail: arm9linux@163.com

导师简介:



朴燕(1965-),女,吉林蛟河人,教授,博士生导师,1988年于哈尔滨工业大学获得学士学位,1995年于中科院长春物理研究所获得硕士学位,2000年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事通信、图像显示、智能目标识别、数字信号处理等方面的研究。E-mail: piaoyan66@126.com