

## 两栖球形机器人的路径规划策略

马宇科, 郑亮, 胡高凯, 吉晓雯, 司兆怡, 刘晏彤

引用本文:

马宇科, 郑亮, 胡高凯, 等. 两栖球形机器人的路径规划策略[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(8): 1733–1742.

MA Yu-ke, ZHENG Liang, HU Gao-kai, et al. Path planning strategy of amphibious spherical robot[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(8): 1733–1742.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/OPE.20202808.1733>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 非线性反馈和二次型调节器在两栖机器人中的应用

Application of nonlinear feedback and quadratic regulators in amphibious robots

*光学精密工程*. 2019, 27(10): 2199–2206 <https://doi.org/10.3788/OPE.20192710.2199>

### 自由漂浮空间机器人最小基座扰动路径规划

Path planning for minimizing base disturbance of free-floating space robot

*光学精密工程*. 2017, 25(12z): 67–73 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172514.0067>

### 基于控制变量参数化方法的自由漂浮空间机器人路径规划

Path planning of free-floating space robot based on control variable parameterization method

*光学精密工程*. 2019, 27(2): 372–378 <https://doi.org/10.3788/OPE.20192702.0372>

### 叶片复杂曲面的机器人抛磨工艺规划

Robotic grinding process planning for complex blade surfaces

*光学精密工程*. 2018, 26(1): 132–141 <https://doi.org/10.3788/OPE.20182601.0132>

### 2RPU/UPR+RP五自由度混联机器人参数标定研究

Parameter calibration of five-degree-of-freedom hybrid robot 2RPU/UPR+RP

*光学精密工程*. 2020, 28(1): 119–129 <https://doi.org/10.3788/OPE.20202801.0119>

文章编号 1004-924X(2020)08-1733-10

## 两栖球形机器人的路径规划策略

马宇科<sup>1</sup>, 郑亮<sup>1,2\*</sup>, 胡高凯<sup>1</sup>, 吉晓雯<sup>1</sup>, 司兆怡<sup>1</sup>, 刘晏彤<sup>1</sup>

(1. 吉林农业科技学院, 吉林 吉林 132101;

2. 长春理工大学, 吉林 长春 130022)

**摘要:**两栖机器人的水下路径最优规划是目前机器人运动控制研究领域的热点和难点。本文针对两种基于视觉伺服的广义约束优化(GCOP)和序列二次规划(SQP)的机器人运动控制算法进行对比分析,结合视觉伺服传感器,实现了两栖机器人最佳路径的规划、监测动态目标标定、移动目标监测、水下障碍物识别和目标跟踪。利用球形机器人的结构对称特性及阿基米德浮力原理,并结合模糊控制算法对水舱水位进行实时控制,使球形两栖机器人在水下能实现水下多自由度运动。最后,进行了算法的仿真和水下运动实验。实验结果表明,GCOP算法和SQP算法在相对障碍物的有限距离内,SQP算法规划的路径更加合理;而在达到目标坐标位置上,两种算法的误差为167.5 mm,SQP算法在水下路径规划上更加有效。

**关键词:**两栖机器人;球形机器人;路径规划;目标识别

**中图分类号:**TH73 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20202808.1733

## Path planning strategy of amphibious spherical robot

MA Yu-ke<sup>1</sup>, ZHENG Liang<sup>1,2\*</sup>, HU Gao-kai<sup>1</sup>, JI Xiao-wen<sup>1</sup>, SI Zhao-yi<sup>1</sup>, LIU Yan-tong<sup>1</sup>

(1. Jilin Agricultural Science and Technology University, Jilin 132101, China;

2. Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

\* Corresponding author, E-mail: s18d505@stu.kagawa-u.ac.jp

**Abstract:** The underwater path planning of amphibious spherical robots is currently a research challenge in the field of amphibious robot motion control. In this study, two types of robot motion control algorithms, namely Generalized Constraint Optimization (GCOP) and Sequential Quadratic Programming (SQP) algorithms based on visual servo, were compared and analyzed. The optimal path planning of the amphibious spherical robot was realized, combined with visual servo sensors. Dynamic target calibration, moving target monitoring, underwater obstacle recognition, and target tracking-functions were also developed. Furthermore, this study considered the symmetrical structure of spherical robots (using Archimedes' buoyancy principle) and combined fuzzy control algorithms to control the water level of the water tank so that spherical amphibious robots can achieve multi-DOF underwater motion. Finally, algorithm simulations and underwater motion experiments were performed to verify the feasibility of the proposed method. The results show that path planning by the SQP algo-

**收稿日期:**2020-01-09;**修订日期:**2020-02-18.

**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资助项目(No. 201911439027);吉林农业科技学院青年基金资助项目(No. 20190505)

rithm is more reasonable considering the distance between the GCOP and SQP algorithms, relative to the obstacle. In reaching the target coordinate position, the error between the two algorithms reaches to 167.5 mm, showing that the SQP algorithm is superior in underwater path planning than the GCOP algorithm.

**Key words:** amphibious robot; spherical robot; path planning; target recognition

## 1 引 言

目前,在机器人研究领域,两栖仿生机器人的研究逐步成为研究热点,通过对一种动物运动方式的长时间观察与研究,提出了相应具有运动模式的仿生机器人的设计方案。这类机器人具有较为灵活的两栖运动能力,能够在水下实现最佳的路径控制和对目标具有一定的识别与追踪能力,但是,以往提出的仿生机器人大多只适应于水下的运动环境,对于目前所需要的两栖运动环境并不合适,球形两栖机器人能够很好地解决这一问题。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。由于两栖机器人特殊的灵活性、超强的适应能力、便于投放和回收的优越特性,使它可以独立在水下完成侦查、搜救、探测、数据收集等工作。所以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。本文提出的两栖球形机器人是一种先进的执行装置,包括运动推进器,传感器,控制板和安装在球形壳体中的电源装置。作为微型球形机器人,这种机器人得到广泛应用主要依靠四个技术优势。第一个特点是球形机器人是一种可移动行走的移动机器人,可以保持先进的平衡性、稳定性和运动连续性。第二个特点是球形机器人具有良好的密封性,可以完全保护内部控制单元和机构,这是其他机器人无法做到的。第三个特点是球形机器人具有很强的适应性,能在无人区、灰尘、湿气、腐蚀性和恶劣环境下完成任务。最后是矢量推进器具有更高的稳定性和灵活性,能使机器人保持更好的水下运动性能和抗噪声干扰能力。

两栖机器人控制技术发展迅速,北京理工大学仿生机器人与系统教育部重点实验室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。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,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,该球基本实现了球形机器人的基本功能,但没有实现水下的自动路径规划<sup>[1-3]</sup>。北京邮电大学孙旭团队研究的球形机器人以摩擦力为驱动力,没有被动摩擦力的球形机器人,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<sup>[4]</sup>。哈尔滨工程大学叶秀芬团队,也对球形机器人“基于喷水推进的微小球形水下潜器”进行了深入的研究<sup>[5]</sup>。天津理工大学郭健团队也对球形机器人在陆地上的路径规划进行了深入的研究<sup>[6]</sup>。但目前针对水下路径规划的相关研究相对较少。

机器人执行有障碍的复杂水下任务时,路径规划对水下机器人实现任务目标具有非常重要的意义。文献[7]提出了一种基于先验知识强化学习策略的最佳路径选择的新算法。针对未知空间中移动机器人的路径规划问题,Yuan等提出了一种基于门控递归单元-递归神经网络模型的动态路径规划方法<sup>[8]</sup>。Bae等提出了一种结合深度学习和卷积神经网络的多机器人路径规划算法<sup>[9]</sup>。文献[10]提出了一种非完整的三轮移动机器人的路径规划和控制方法,该机器人用于在道路跟踪和复杂环境中进行在线导航。文献[11]开发了一种“增强轮辋跳跃”的方法,该方法不依赖于逐点定位,而是通过找到障碍物之间的多次切线来获得最短路径。尽管在两栖球形机器人的路径规划方面已有许多研究,但是多数研究是基于单一的陆地环境下进行的。本文以实现球形两栖机器人最佳路径规划为研究目标,针对两种基于视觉伺服的广义约束优化(Generalized Constraint Optimization, GCOP)和序列二次规划(Sequential Quadratic Procontrol, SQP)的机器人运动控制算法进行对比分析,使用视觉伺服传感器实现两栖

机器人的最佳路径规划,并实时对监测动态目标进行标定、移动目标监测、水下障碍物识别和目标跟踪。最后,通过水下运动测试和仿真来对比验证算法的可行性。该运动的路径规划方案提高了球形两栖机器人的运动性能,使机器人可以执行更为复杂的水下任务。

## 2 两栖球形机器人设计

### 2.1 机械设计

新型两栖球形机器人不仅具有良好的陆地运动能力,而且能够实现水下多自由度的运动。图 1 是机器人陆地运动模式和水下运动模式的结构。在陆地模式下,机器人下半球壳体通过两个舵机折叠至上半球,4 个喷水推进器根据相应步态调整实现陆地行走<sup>[12]</sup>。在水下模式下,下半球闭合,机器人可以利用 4 个水下推进器实现水下多自由度运动。相比其他两栖球形机器人,加入了稳定控制块、4 个激光测距模块和 4 个视觉采集模块,用来实现路径规划的相关参数采集。

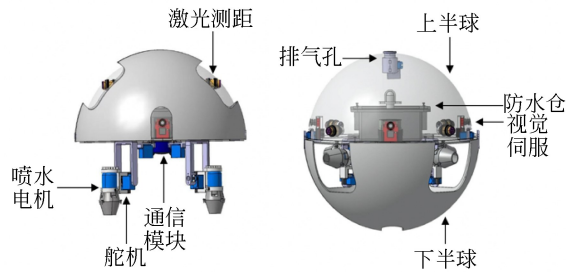


图 1 两栖球形机器人的机械结构

Fig.1 Mechanism of amphibious spherical robot

### 2.2 硬件构成

两栖球形机器人采用模块化设计,通过各模块的合理分布与协调工作,保证球体运动的可靠性和稳定性。如图 2 所示,球体主要搭载一块嵌入式处理器(ARM S3C6410,2 GB DDR3,linux 3.12.0),用于数据处理;GPS 模块和声纳模块用于机器人通讯。陀螺仪传感器对机器人进行姿态感应与调整,伺服电机和电机控制器控制机器人的运动和姿态,图像采集模块用于机器人的视觉识别与动态目标捕捉,5000 mA 锂电供电模块用于机器人的供电。

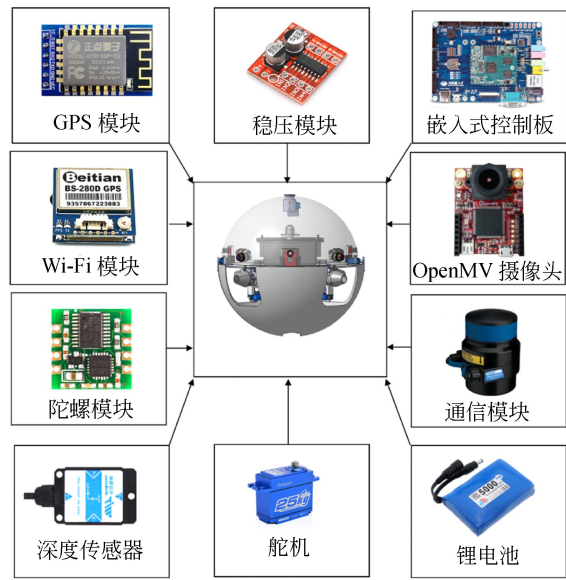


图 2 两栖球形机器人的硬件结构

Fig.2 Hardware structure of amphibious spherical robot

## 3 两栖球形机器人上浮下潜原理

球体分为上半球和下半球两个仓室,如图 3 所示,下仓室装有排水口,通过上仓室的仓室气泵将上仓室的空气压入下仓室,通过下仓室的水压调节罐控制水箱的进水量,根据阿基米德浮力原理,球体的浮力由球体排开水的体积决定。当机

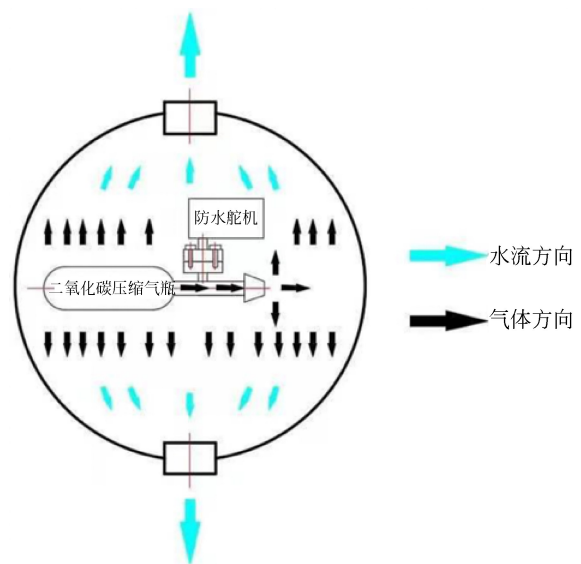


图 3 机器人上浮和下潜原理

Fig.3 Principle for robot floating and diving

器人下潜时,防水舵机顺时针旋转,将放气的阀门关闭,水从球体一端的孔进入,由于压力的作用,原本在球体内部的气体从球的另一端排出。水的重量再加上球体本身防水舵机的重量使球形机器人进行下潜。上浮时,防水舵机逆时针旋转,将二氧化碳气瓶中的压缩二氧化碳气体放出,此时排气孔和进水孔都变成了排水孔,机器人上浮。

## 4 运动控制和路径规划算法

### 4.1 非线性 6 自由度算法

两栖球形机器人能够在陆地与水下多自由度运动,在陆地上要具有 4 个自由度,在水下要具有 6 个自由度的运动模式。

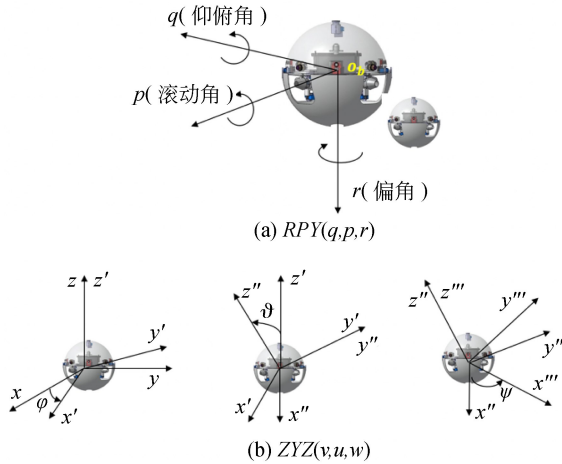


图 4 6 自由度建模坐标标定

Fig. 4 Calibration of 6-DOF modeling coordinate

6 自由度包括  $RPY(q, p, r)$  和  $ZYZ(v, u, w)$  参考系。为了达到精确控制的目的,分别给出了两种受控源的旋转矩阵。如图 4 所示,参考坐标以  $x$  轴围绕的角度“ $q$ ”旋转,并用矩阵  $\mathbf{R}_x(q)$  表示。参考坐标以  $Y$  轴围绕的角度“ $p$ ”旋转,并用矩阵  $\mathbf{R}_y(p)$  表示。参考坐标以  $Z$  轴围绕的角度“ $r$ ”旋转,并用矩阵  $\mathbf{R}_z(r)$  表示<sup>[13]</sup>。

$$\mathbf{R}(\varphi) = \mathbf{R}_x(q)\mathbf{R}_y(p)\mathbf{R}_z(r) = \begin{pmatrix} C_q C_p & C_q S_p S_r - S_q C_r & C_q S_p C_r + S_q S_r \\ S_q C_p & S_q S_p S_r + C_q C_r & S_q S_p C_r + C_q S_r \\ -S_p & C_p S_r & C_q C_r \end{pmatrix}. \quad (1)$$

假设参考坐标绕  $Z$  轴旋转一个  $\varphi$  的角度,并且旋转矩阵为  $\mathbf{R}_z(\varphi)$ ,参考坐标绕  $Y$  轴旋转一个  $\vartheta$  的角度,并且旋转矩阵为  $\mathbf{R}_y(\vartheta)$ ,参考坐标绕  $Z$  轴旋转一个  $\psi$  的角度,并且旋转矩阵为  $\mathbf{R}_z(\psi)$ 。最终坐标系的方向是通过合成相对于当前坐标系的旋转矩阵并通过右乘计算得出的,获得基本矩阵为:

$$\mathbf{R}(\Phi) = \mathbf{R}_z(\varphi)\mathbf{R}_y(\vartheta)\mathbf{R}_z(\psi). \quad (2)$$

旋转矩阵为:

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

参数  $\vartheta$  在  $[\pi, 0]$ , 可以表示为:

$$\begin{cases} \varphi = \text{Atan } 2(r_{23}, r_{13}) \\ \vartheta = \text{Atan } 2(\sqrt{r_{13}^2 + r_{23}^2}, r_{33}) \\ \psi = \text{Atan } 2(r_{32}, -r_{31}) \end{cases} \quad (4)$$

参数  $\varphi$  在  $[-\pi, 0]$ , 可以表示为:

$$\begin{cases} \varphi = \text{Atan } 2(-r_{23}, r_{13}) \\ \vartheta = \text{Atan } 2(-\sqrt{r_{13}^2 + r_{23}^2}, r_{33}) \\ \psi = \text{Atan } 2(-r_{32}, -r_{31}) \end{cases} \quad (5)$$

### 4.2 GCOP 控制算法

假设物体的表面由  $m$  个方程表示为:  $h_i(x)$ ,  $i=1, 2, \dots, m$ , 并且它的内部方程为<sup>[14-16]</sup>:

$$h_1 < 0 \wedge h_2 < 0 \wedge \dots \wedge h_m < 0. \quad (6)$$

对每个  $h_i$  构造新的函数:

$$v_i = (h_i^2 + t^2)^{1/2} + h_i, \quad (7)$$

其中:  $t$  是一个小的正实数,  $v_i$  是  $x$  和  $t$  的函数, 对整个物体, 构造函数  $V$ :

$$V = v_1 + v_2 + \dots + v_m = \sum_{i=1}^m v_i. \quad (8)$$

验证从  $h_i$  到  $v_i$  和  $v_i$  到  $V$  的两个变换的性质。首先, 函数  $v_i$  对任意  $x$  和  $t$  总是正的, 其次,  $v_i$  是关于  $h_i$  的递增函数, 即当  $h_i > 0$  时  $v_i$  的值和当  $h_i < 0$  时  $v_i$  的值。如果  $t \ll 1$ ,  $v_i$  可以近似表示为:

$$\begin{cases} v_i = 2h_i + O(t^2) \gg t > 0, h_i > 0 \\ v_i \approx t, h_i = 0 \\ v_i \approx O(t^2), h_i < 0 \end{cases}, \quad (9)$$

其中:  $O(t^2)$  为一个值非常小的正数。式(9)表明, 除了点在物体表面附近时,  $h_i = 0$ ; 当  $h_i > 0$  时,  $v_i > t$ ; 当  $h_i < 0$  时,  $v_i < t$ 。

对于在物体  $h_i$  内部和边界附近的点, 其他函

数值  $h_i (j=1,2,\dots,m, j \neq i)$  是小于零的,因此得到  $v_i = O(t^2)$ 。将式(7)替换到式(9)中,得到:

$$\begin{cases} V \gg t, (h_1 > 0) + (h_2 > 0) + \dots + (h_m > 0) \\ V \approx t + O(t^2), (h_1 = 0 \wedge h_j < 0, j = 2, 3, \dots, m) + (h_2 = 0 \wedge h_j < 0, j = 1, 3, 4, \dots, m) + \dots + (h_m = 0 \wedge h_j < 0, j = 1, 2, \dots, m-1) \\ V \approx O(t^2), (h_1 < 0) \wedge (h_2 < 0) \wedge \dots \wedge (h_m < 0) \end{cases} \quad (10)$$

从式(10)可以看出,当所有的  $h_i$  是负,即点在物体内部时,函数  $V$  非常小;当点在物体外部时,  $V \gg t + O(t^2)$ ;当点在物体边界附近时,  $V \approx t$ 。

考虑当  $t \rightarrow 0$  时,则有:

$$\begin{cases} v_i > 0, h_i > 0 \\ v_i = 0, h_i \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

两个正数的和还是正数,一个正数与零的和是正数,两个零的和是零。因此,如果把正数作为逻辑“1”,把零作为逻辑“0”,那么式(11)中  $v_i$  的“加”操作对应了布尔“或”运算。所以得到:

$$\begin{cases} V > 0, (h_1 > 0) \vee (h_2 > 0) \vee \dots \vee (h_m > 0) \\ V = 0, (h_1 \leq 0) \wedge (h_2 \leq 0) \wedge \dots \wedge (h_m \leq 0) \end{cases} \quad (12)$$

在水下机器人路径规划中,不期望路径太靠近障碍物。因此,引入一个小的正数  $\Delta v$  作为路径到障碍物的距离控制参数,如果  $x$  满足以下不等式:

$$V = \sum v_i \geq \Delta v \text{ 或 } \Delta v - \sum v_i < 0. \quad (13)$$

那么这个点一定在由式(13)所确定的障碍物的外部。如果  $\Delta v \rightarrow 0$ ,由  $\Delta v - \sum v_i \leq 0$  确定的边界将趋近于障碍物的表面。如果一个物体的表面和外部由  $(h_1 \geq 0) \vee (h_2 \geq 0) \vee \dots \vee (h_m \geq 0)$  确定,那么它的外部同样可以由  $\Delta v - \sum v_i \leq 0$  确定,其中  $\Delta v \rightarrow 0$ 。  $x$  若满足  $\Delta v - \sum v_i \leq 0$ ,那么  $x$  就落在物体的外部。

### 4.3 SQP 控制算法

为了在三个维度上对两栖球形机器人进行建模,必须设定 6 个独立变量构建环境的空间位置、方向、大小和形状,  $O = O(x_0, y_0, z_0)$  代表机器人的几何中心,  $\theta = (\theta_1, \theta_2, \theta_3)$  代表机器人的定位方向<sup>[17-19]</sup>。

$$x = x(x_0, y_0, z_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \mathbf{v}), \quad (14)$$

$$y = y(x_0, y_0, z_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \mathbf{v}), \quad (15)$$

$$z = z(x_0, y_0, z_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \mathbf{v}), \quad (16)$$

其中:  $x, y, z$  是机器人边界上的一个点,用于构造没有碰撞条件的机器人,  $x_0, y_0, z_0$  是空间位置,  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  是空间方向,  $\mathbf{v}$  是具有两个参数的向量,  $(t_1, t_2)$  用于表示特定机器人的边界点,球形机器人定义如下:

$$\begin{aligned} & [((x-x_0)/r_x)^{2/s_2} + ((y-y_0)/r_y)^{2/s_2}]^{s_2/s_1} + \\ & ((z-z_0)/r_z)^{s_1} = 1, \end{aligned} \quad (17)$$

$$x = r_x \cos^{s_1}(t_1) \cos^{s_2}(t_2), \quad (18)$$

$$y = r_y \cos^{s_1}(t_1) \cos^{s_2}(t_2), \quad -\pi/2 \leq t_1 \leq \pi/2, \quad (19)$$

$$z = r_z \cos^{s_1}(t_1), \quad 0 \leq t_1 \leq 2\pi. \quad (20)$$

基于 SQP 算法,路径规划问题转化为半无限约束优化问题。假设空间中有  $n$  个障碍物,则  $j$  个障碍物的表面可以表示为<sup>[20]</sup>:

$$h_1(x, y, z) = 1, j = 1, 2, \dots, n. \quad (21)$$

整个可用空间可表示为:

$$1 - h_1(x, y, z) \leq 0, j = 1, 2, \dots, n. \quad (22)$$

没有碰撞的必要和充分条件是曲面上所有点都必须无碰撞,获得无碰撞的充分条件是:

$$1 - h_j(x_{loc}, y_{loc}, z_{loc}) \leq 1, \quad (23)$$

其中:

$$x_{loc} = x(x_0, y_0, z_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \mathbf{v})$$

$$y_{loc} = y(x_0, y_0, z_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \mathbf{v})$$

$$z_{loc} = z(x_0, y_0, z_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \mathbf{v}). \quad (24)$$

在路径规划中,配置变量需要一个约束,如公式(25)所示<sup>[21-22]</sup>:

$$\begin{aligned} & x_{0l} \leq x_0 \leq x_{0u}, y_{0l} \leq y_0 \leq y_{0u}, z_{0l} \leq z_0 \leq z_{0u}, \\ & \theta_{1l} \leq \theta_1 \leq \theta_{1u}, \theta_{2l} \leq \theta_2 \leq \theta_{2u}, \theta_{3l} \leq \theta_3 \leq \theta_{3u}. \end{aligned} \quad (25)$$

其中  $(x_{0l}, y_{0l}, z_{0l})$  和  $(x_{0u}, y_{0u}, z_{0u})$  分别是上限和下限,推导得到:

$$\begin{aligned} & 1 - h_j(r_x \cos^{s_1}(t_1) \cos^{s_2}(t_2) (\cos(\theta_1) \cos(\theta_2) \cos(\theta_3) - \sin(\theta_1) \sin(\theta_3)) - \\ & r_y \cos^{s_1}(t_1) \sin^{s_2}(t_2) (\cos(\theta_1) \sin(\theta_3) - \cos(\theta_2) \sin(\theta_2) \sin(\theta_3)) + r_z \sin^{s_1}(t_1) (\cos(\theta_1) \sin(\theta_2)) + x_0, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& r_x \cos^{\delta_1}(t_1) \cos^{\delta_2}(t_2) (-\cos(\theta_1) \cos(\theta_2) \sin(\theta_3) - \sin(\theta_1) \cos(\theta_3)) + \\
& r_y \cos^{\delta_1}(t_1) \sin^{\delta_2}(t_2) (\sin(\theta_1) \cos(\theta_2) \sin(\theta_3) - \cos(\theta_1) \sin(\theta_3)) + r_z \sin^{\delta_1}(t_1) \sin(\theta_2) \sin(\theta_3) + y_0, \\
& r_x \cos^{\delta_1}(t_1) \cos^{\delta_2}(t_2) \cos(\theta_1) \sin(\theta_2) + r_y \cos^{\delta_1}(t_1) \sin^{\delta_2}(t_2) \sin(\theta_1) \sin(\theta_2) + r_z \sin^{\delta_1}(t_1) \cos(\theta_2) + z_0 \leq 0.
\end{aligned} \quad (26)$$

在方程中,  $-\pi/2 \leq t_1 \leq \pi/2, 0 \leq t_2 \leq 2\pi$ 。

在非线性规划问题中, 目标函数必须具有下限的最小值。目标设置必须使全局最小值可变, 二次函数的目标函数表示为:

$$\begin{aligned}
f(x_0, y_0, z_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3) = & \omega((x_0 - x_{0g})^2 + \\
& (y_0 - y_{0g})^2 + (z_0 - z_{0g})^2) + (1 - \omega)((\theta_1 - \theta_{1g})^2 + \\
& (\theta_2 - \theta_{2g})^2 + (\theta_3 - \theta_{3g})^2). \quad (27)
\end{aligned}$$

其最优化点的坐标为  $(x_{0g}, y_{0g}, z_{0g})$ , 最优化角度为  $(\theta_{1g}, \theta_{2g}, \theta_{3g})$ , 并且满足方程式:

$$\begin{aligned}
\min f(x_0, y_0, z_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3) = \\
(x_{0g}, y_{0g}, z_{0g}, \theta_{1g}, \theta_{2g}, \theta_{3g}) = 0. \quad (28)
\end{aligned}$$

在前面的公式中,  $\omega$  表示用于调整空间位置  $(x_0 - x_{0g})^2 + (y_0 - y_{0g})^2 + (z_0 - z_{0g})^2$  和机器人空间方向  $(\theta_1 - \theta_{1g})^2 + (\theta_2 - \theta_{2g})^2 + (\theta_3 - \theta_{3g})^2$  之间的相对关系的权重, 当  $\omega = 1$  时计算空间位置。当  $\omega = 0.5$  时, 空间位置和空间的权重方向必然相等。

## 5 实验及结果分析

### 5.1 仿真实验

为验证两种基于路径规划的 GCOP 和 SQP 在水下两栖机器人的路径规划过程中的有效性, 使用 MATLAB 设置了两种算法, 从初始起始坐标  $O_l = (-200, -200, -200)$  到达目标  $O_u = (600, 600, 600)$  的仿真实验的场景范围。场景空间的长、宽和高为 600 cm 的立方体形状。基于 SQP 算法的不等式  $O_l \leq O \leq O_u$  通过四个参数确保生成的路径在场景内, 坐标分布分别在三维平面上的  $O_s = (x_{0s}, y_{0s}, z_{0s})$ ,  $\theta_s = (\theta_{1s}, \theta_{2s}, \theta_{3s})$ ,  $O_g = (x_{0g}, y_{0g}, z_{0g})$  和  $\theta_g = (\theta_{1g}, \theta_{2g}, \theta_{3g})$ 。GCOP 算法的初始时刻设定  $t = 0, \Delta v = 0.0001$ , 起点坐标为:

$$\begin{aligned}
(x_{0s}, y_{0s}, z_{0s}, \theta_{1s}, \theta_{2s}, \theta_{3s}) = \\
(-200, -200, -200, 0, 0, 0), \quad (29)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
(x_{0g}, y_{0g}, z_{0g}, \theta_{1g}, \theta_{2g}, \theta_{3g}) = \\
(500, 500, 500, 0, 0, 0). \quad (30)
\end{aligned}$$

目标函数定义为:

$$\begin{aligned}
f = \omega[(x_0 - 500)^2 + (y_0 - 500)^2 + \\
(z_0 - 500)^2] + (1 - \omega)(\theta_1^2 + \theta_2^2 + \theta_3^2). \quad (31)
\end{aligned}$$

如果满足等式, 则该坐标点不会与球形障碍物碰撞。在模拟实验中设置了 4 个球形障碍物, 为确保基于两种算法的准确性。4 个障碍物的坐标和方程定义为:

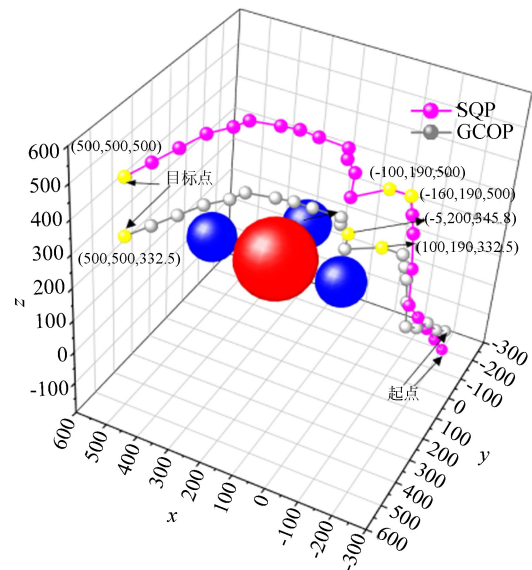
$$\begin{aligned}
(x - 200)^2 + (y - 200)^2 + (z - 200)^2 = 50^2, \\
x^2 + (y - 200)^2 + (z - 200)^2 = 30^2, \\
(x - 400)^2 + (y - 200)^2 + (z - 200)^2 = 30^2, \\
(x - 200)^2 + y^2 + (z - 200)^2 = 30^2. \quad (32)
\end{aligned}$$

球形机器人的参数为  $(r_x, r_y, r_z)$  是对象的几何间隔 ( $s_1 = 1, s_2 = 1.5$  表示机器人的形状是球形):

$$r_x = 5, r_y = 4, r_z = 3, s_1 = 1, s_2 = 1.5. \quad (33)$$

图 5 为仿真结果(彩图见期刊电子版), 在起点和目标点之间有 4 个障碍。粉色球和灰色球表示不同算法的两栖机器人的运动轨迹。3 个蓝色球体和 1 个红色球体分别代表障碍物。

机器人从起始位置到目标位置经过 4 个障碍物, 两种算法比较, SQP 算法在路径规划上更加合理, 并在 3 个采样点处(黄色圆点)离障碍



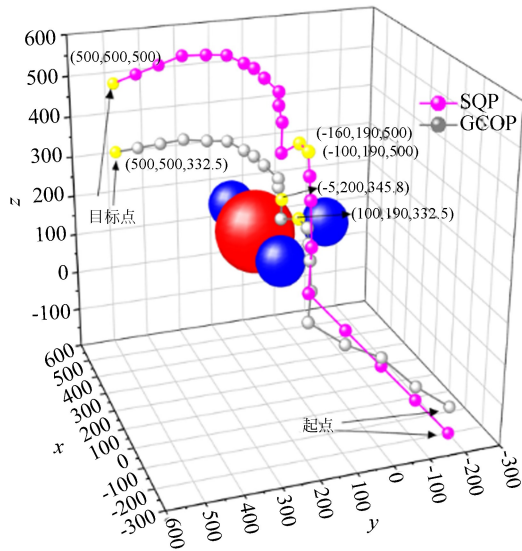


图 5 两种路径规划算法仿真分析

Fig. 5 Simulation analysis of two path planning algorithms

物始终保持了安全距离。但 GCOP 算法选择的路径在坐标点  $(-100, 190, 332.5)$  处离障碍物较近,如机器人发生小角度偏移,有发生碰撞的危险。所以 SQP 算法比 GCOP 算法在安全路径规划的路径控制方面更加有效。而在达到目标坐标位置上,两种算法的误差  $\Delta d = 167.5$  mm,因此 SQP 算法在水下路径规划上更具有优势。

### 5.2 水下实验

为了进一步验证文章所提出算法的有效性,本文设计了基于 SQP 算法的水下测试实验,实验是在长 1 500 mm,宽为 1 000 mm,高度为 800 mm 的封闭水池环境下进行,如图 6 所示。图中设置了跟仿真环境相匹配的 4 个球形障碍物,分别设计障碍物的固定坐标位置。机器人从起点出发,激光测距模块和图像采集传感器实时采集障碍物在水中的坐标,并实时调整机器人的运动轨迹,按算法程序中设定的最佳路径移动到目标位置。图 7(a)是  $t=0$  s 时刻机器人的初始位置,箭头标明了规划的机器人最优路径轨迹。

图 7(b)~7(i)是机器人从  $t=0$  s 移动至  $t=15$  s 的实际运动轨迹。在实验过程中,采集 6 个

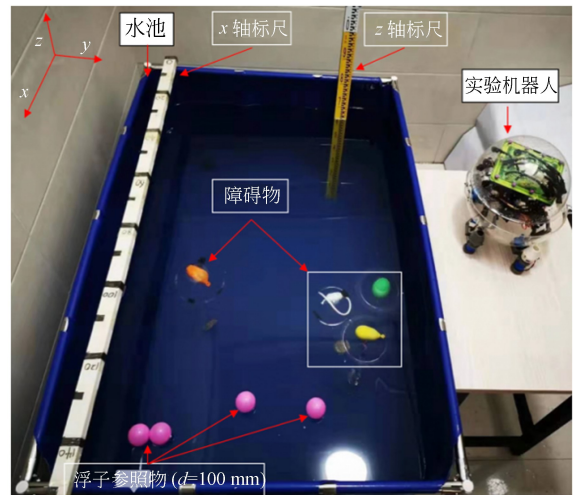


图 6 球形机器人避障实验环境

Fig. 6 Experimental setup for avoiding obstacles of robot

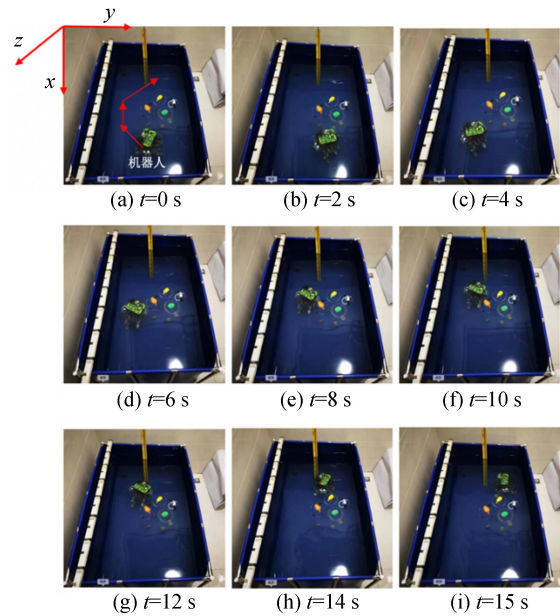


图 7 SQP 路径规划算法的实验图片

Fig. 7 Photos of path planning by SQP algorithm

不同的时间点,对机器人  $y$  轴和  $z$  轴方向的位移变化曲线进行采样,从而判断机器人在最佳路径选择上的稳定性和可靠性。从图 8 可以看出,机器人分别在第二个和第三个采样点偏移误差较大,误差值达到 20 mm,在其余 4 个采样点误差小于 10 mm,这是因为机器人在第二个到第三个采样点主要是对路径的选择阶段,从而影响了机器人的运动形态。机器人的运动轨迹如图 9 所示。

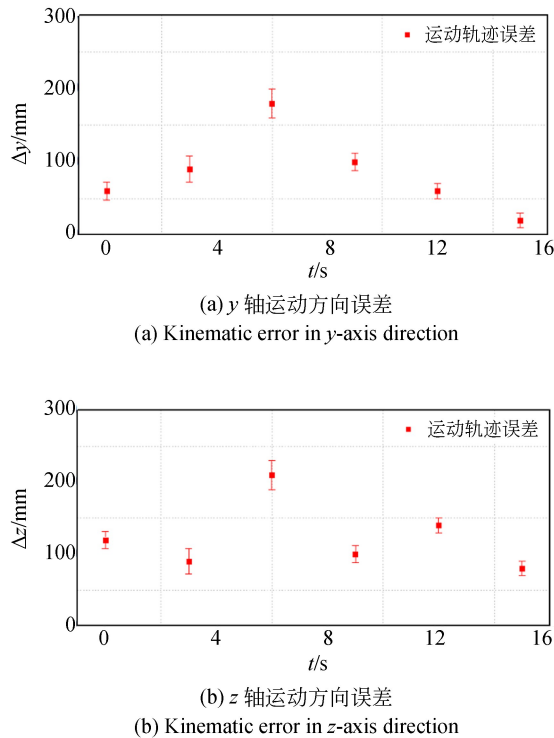


图 8 球形机器人  $y$  轴和  $z$  轴运动方向误差  
Fig. 8 Kinematic errors of robot in  $y$ -axis and  $z$ -axis

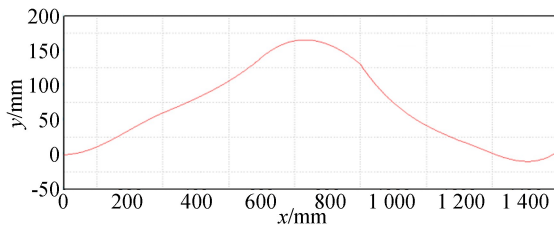


图 9 球形机器人的最佳路径轨迹  
Fig. 9 Optimal path trajectory of spherical robot

## 参考文献:

- [1] 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.
- [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] ZHENG L, GUO S X, PIAO Y, et al.. Collabora-

## 6 结 论

本文提出了两种基于路径规划的算法 (GCOP 和 SQP), 通过设置 4 个不同尺寸的球形障碍物使两栖球形机器人可以通过视觉伺服传感器实现避障功能并选择最佳路径。在实验中, 设置 3 个采样点对两种路径规划算法进行评估, 基于 GCOP 算法在  $(-100, 190, 500)$  和  $(-5, 200, 345.8)$  处距离障碍物较近; 而基于 SQP 算法在相对应的采集点处坐标分别为  $(-100, 190, 500)$  和  $(-160, 190, 500)$ , 相对处于离障碍物较为安全和合理的位置。在终点坐标位置, 基于 GCOP 算法到达预计终点坐标为  $(500, 500, 332.5)$ , 偏离了预先设定的终点坐标, 而基于 SQP 算法到达终点的坐标为  $(500, 500, 500)$ , 基本达到预先路径规划的要求。通过 3 个坐标点的数据显示分析, 两个采样点的坐标偏差最优化是要保证距离障碍物的距离在合理范围之内, SQP 算法在两个采集点处的障碍物距离更加合理。在第三个终点采样点, 两种算法的机器人运动轨迹偏差为 167.5 mm。实验表明, 对于两栖水下机器人的水下运动控制, 基于 SQP 的路径规划算法比 GCOP 的路径规划算法更具有优越性。

未来的研究工作会在机械设计和控制方法上持续改进, 以实现多机器人的水下多机协作控制与路径规划的最优控制。

- tion and task planning of turtle-inspired multiple amphibious spherical robots [J]. *Micromachines*, 2020, 11(1): 71.
- [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 & Control of Computer*, 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: 15-19. YANG H B. *Research on the Key Technologies of*

- the Underwater Spherical Robot* [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018: 15-19. (in Chinese)
- [6] GUO J, LI C Y, GUO S X. A novel step optimal path planning algorithm for the spherical mobile robot based on fuzzy control[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 1394-1405.
- [7] LIU X H, ZHANG D G, YAN H R, *et al.*. A new algorithm of the best path selection based on machine learning [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 126913-126928.
- [8] YUAN J Y, WANG H J, LIN C J, *et al.*. A novel GRU-RNN network model for dynamic path planning of mobile robot[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 15140-15151.
- [9] BAE H, KIM G, KIM J, *et al.*. Multi-robot path planning method using reinforcement learning[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(15): 3057.
- [10] ALI M A H, MAILAH M. Path planning and control of mobile robot in road environments using sensor fusion and active force control[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(3): 2176-2195.
- [11] YAO Z, ZHANG W M, SHI Y L, *et al.*. ReinforcedRimJump: tangent-based shortest-path planning for two-dimensional maps[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(2): 949-958.
- [12] ZHENG L, PIAO Y, MA Y K, *et al.*. Development and control of articulated amphibious spherical robot[J]. *Microsystem Technologies*, 2020, 26(5): 1553-1561.
- [13] 郑亮, 朴燕, 马宇科. 非线性反馈和二次型调节器在两栖机器人中的应用[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(10): 2199-2206.
- ZHENG L, PIAO Y, MA Y K, Application of nonlinear feedback and quadratic regulators in amphibious robots[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(10): 2199-2206. (in Chinese)
- [14] 张旭, 曾祥鑫, 郎博. 基于控制变量参数化方法的自由漂浮空间机器人路径规划[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(2): 372-378.
- ZHANG X, ZENG X X, LANG B. Path planning of free-floating space robot based on control variable parameterization method[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(2): 372-378. (in Chinese)
- [15] YU J Z, LIU J C, WU Z X, *et al.*. Depth control of a bioinspired robotic dolphin based on sliding-mode fuzzy control method[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(3): 2429-2438.
- [16] ZHANG S W, QIAN Y, LIAO P, *et al.*. Design and control of an agile robotic fish with integrative biomimetic mechanisms[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016, 21(4): 1846-1857.
- [17] 曾祥鑫, 关英姿, 晏卓, 等. 自由漂浮空间机器人最小基座扰动路径规划[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(12z): 67-73.
- ZENG X X, GUAN Y Z, YAN ZH, *et al.*. Path planning for minimizing base disturbance of free-floating space robot[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(12z): 67-73. (in Chinese)
- [18] 陈原, 何淑垒, 姜媛, 等. 轮-腿复合式移动机器人球面并联腿机构的动力学模型[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(8): 1800-1810.
- CHEN Y, HE SH L, JIANG Y, *et al.*. Dynamic model of spherical parallel mechanism for wheel-leg hybrid mobile robot[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(8): 1800-1810. (in Chinese)
- [19] WANG W, DAI X, LI L, *et al.*. Three-dimensional modeling of a fin-actuated robotic fish with multimodal swimming[J]. *ASME Transactions on Mechatronics*, 2018, 23(4): 1641-1652.
- [20] WU Z X, LIU J C, YU J Z, *et al.*. Development of a novel robotic dolphin and its application to water quality monitoring[J]. *ASME Transactions on Mechatronics*, 2017, 22(5): 2130-2140.
- [21] 徐彦伟, 刘明明, 刘洋, 等. 基于信息融合的机器人薄壁轴承故障智能诊断[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(7): 1577-1592.
- XU Y W, LIU M M, LIU Y, *et al.*. Intelligent fault diagnosis of thin wall bearing based on information fusion[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(7): 1577-1592. (in Chinese)
- [22] 刘涛, 尹仕斌, 任永杰, 等. 机器人工具坐标系自动校准方法[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(3): 661-670.

LIU T, YIN SH B, REN Y J, *et al.*. Automatic calibration of robot tool center frame robot tool

center frame[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27 (3): 661-670. (in Chinese)

作者简介:



马宇科(1996—),男,吉林通化人,主要从事机器人机械结构设计和机器人建模相关方向的研究。E-mail: frank-ma120816@163.com

通讯作者:



郑亮(1982—),男,吉林吉林人,博士研究生,讲师,2006、2010年于长春理工大学分别获得学士、硕士学位,2015年至今香川大学(日本)在读博士,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: s18d505@stu.kagawa-u.ac.jp