

# 基于声呐的水下机器人避障系统研究

林奕雪

福建信息职业技术学院 福州 350003

**摘要:** 水下机器人是一个代替人类下潜到水下,感知海洋及周边领域环境的必不可少的工具。它在看护潜水员安全、海洋生物研究、港口航道建设及其安全防御、水下打击等方面都发挥着重要作用。而水下机器人的避障系统则是它能否安全完成作业的关键。由于水下环境的复杂性,且机器人运动易受干扰,传统避障算法无法直接使用。针对以上情况,本项目在水下机器人上设计搭载了一个基于声呐的避障系统,实现了准确躲避障碍物的功能。

**关键词:** 水下机器人; 声呐; 改进的人工势场法; 避障

## Research on the underwater robot obstacle avoidance system based on sonar

Yixue Lin

Intelligent Manufacturing College, Fujian Institute of Information Technology, Fuzhou, 350003

**Abstract:** Underwater robot is an essential tool to replace humans to dive underwater and perceive the environment of the ocean and surrounding fields. It plays an important role in nursing diver safety, Marine biology research, port and channel construction and its safety defense, underwater strike and so on. The underwater robot's obstacle avoidance system is the key to whether it can complete the operation safely. Due to the complexity of the underwater environment and the vulnerability of the robot movement, the traditional obstacle avoidance algorithm cannot be used directly. In view of the above situation, this project has designed and carried a sonar obstacle avoidance system based on the underwater robot to realize the function of accurately avoiding obstacles.

**Keywords:** underwater robot, sonar, improved artificial potential field method, obstacle avoidance

### 引言:

由于海底压强大,环境地形险要,水下机器人便成为替代人类揭开大海之谜的卓越工具<sup>[1]</sup>。其中,水下机器人的避障研究是该领域中一个备受关注的前沿方向。从应用上来说,这一研究可以令更多的水下机器人成功用于看护潜水员安全、探索重要海底资源、定期的海洋监控、军事导航和战术监控等,具有重要研究价值和应用价值<sup>[2]</sup>。

水下环境相比陆地上更复杂,需要更好地感知周围

环境信息并做出更准确的运动判断。目前,水下机器人探测传感器主要有水下相机和声呐。前者水下成像模糊失真,可探测范围小;后者探测范围广,能够探测到周围物体的具体位置信息<sup>[3]</sup>。且水下存在暗礁和水流干扰,需要合适的避障算法以保证水下机器人的安全作业。本文基于上述情况,展开水下机器人避障系统的搭建、测试、验证算法可行性研究。

### 一、声呐信息采集

声呐能辅助水下机器人感知更广范围内障碍物的位置信息,并不受水质和光照的影响。本文使用“Outland1000”型水下机器人并配置以Tritech公司的单波束机械扫描前视声呐,如图1。该前视声呐能探测到50米水深周围360度范围内的水域环境的信息,并通过串口通讯技术,将获得的回波数据传至岸上的控制计算机上。

**基金项目:** 院级科研基金项目Y21105基于视觉的水下机器人避障和目标跟踪研究

**作者简介:** 林奕雪,女,1991.7,工业机器人专任教师。

**About the author:** female,1991.7,Industrial robot full-time teacher

声呐主要通过发射探测波速，并接受回声信号实现对周围环境的探测。回声信号中包含了周围障碍物的位置和方位信息，因此获取声呐的回波数据并解析是进行声呐探测的关键步骤。



图1 Outland1000水下机器人(红圈内为声呐)

获取声呐回波数据的具体过程是:

- (1) 判断声呐与PC之间能够正常进行通信。
- (2) 定时地发送声呐启动指令，并接收声呐传回的数据。
- (3) 解析回波数据，得到障碍物位置信息，并显示成图像。

本文采用VS2010编写声呐和PC之间的通信成像软件，如图2所示，在“声呐参数设置”面板上可设置声呐扫描距离、扫描速度、扫描区域及显示模式等参数。当参数设置好后打开串口便能够控制计算机和声呐开始通信，界面的右半部分显示采集到的声呐图像。

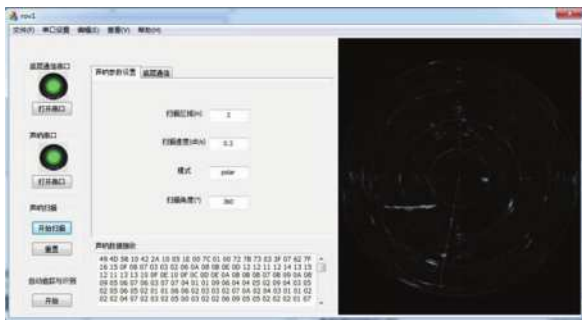


图2 编写的声呐通信软件

## 二、水下避障系统算法设计

本文通过改进的人工势场方法实现水下机器人避障，同时该方法能够削弱水流的干扰。人工势场法的核心思想是将机器人在环境中的运动视为机器人在虚拟人工受力场的运动，并构建在目标点产生的引力场和在障碍物产生的斥力场<sup>[4]</sup>。为简化问题，假设水下机器人在作业中保持深度不变，即其重心保持在同一个水平面内进行实时避障运动，构建二维平面下的人工势场模型。

设二维平面中，水下机器人与目标点之间的距离函数如下:

$$\rho(r, g) = \|r(x_1, y_1) - g(x_2, y_2)\| \quad (1)$$

产生的引力场引用静电场的势场模型如下:

$$U_{att}(\rho(r, g)) = \xi \|\rho(r, g)\|^m \quad (2)$$

式中 $m$ 为正常数，决定着势场函数的曲线形状。根据一般人工势场法对 $m$ 的取值，取 $m=2$ 。则目标点对水下机器人的吸引力如下:

$$F_{att} = -\nabla U_{att}(\rho(r, g)) = m \|r(x_1, y_1) - g(x_2, y_2)\|^{m-1} n_{RG} \quad (3)$$

式(3)中 $n_{RG}$ 为机器人到目标的单位矢量。

设障碍物位置是 $o(x_3, y_3)$ ， $F_{rep}$ 是障碍物周围斥力场产生的斥力分量，水下机器人与第 $i$ 个障碍物 $o(x_3, y_3)$ 距离函数如下:

$$\rho_i(r, o) = \|r(x_1, y_1) - o(x_3, y_3)\| \quad (4)$$

则第 $i$ 个障碍物产生的斥力势场表示如下:

$$U_{rep}(\rho_i(r, o)) = \begin{cases} \frac{1}{2} \eta \left( \frac{1}{\rho_i(r, o)} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2, & \rho_i(r, o) < \rho_0 \\ 0, & \rho_i(r, o) > \rho_0 \end{cases} \quad (5)$$

其中， $\eta$ 是斥力尺度因子， $\rho_0$ 为每个障碍物的影响半径，则水下机器人受到的总斥力势场 $U_{reps}$ 表示如下:

$$U_{reps} = \sum_{i=1}^N U_{rep}(\rho_i(r, o)) \quad (6)$$

式子中 $N$ 为机器人周围障碍物的总个数，因此水下机器人所受总斥力 $F_{reps}$ 如下:

$$F_{reps} = -\nabla U_{reps} \quad (7)$$

传统人工势场法中，若障碍物与目标点太过接近则会产生局部最小问题，使得水下机器人无法到达目标点。导致局部最小问题的原因是当机器人靠近目标时，斥力和引力大小相近然而方向却相反<sup>[5]</sup>。本文对此进行改进，对原斥力场函数乘以一个因子 $(\rho(r, g))^n$ 使得目标位置斥力为0。修正的斥力势场函数如下:

$$U_{rep}(\rho_i(r, o)) = \begin{cases} \frac{1}{2} \eta \left( \frac{1}{\rho_i(r, o)} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2 (\rho(r, g))^n, & \rho_i(r, o) \leq \rho_0 \\ 0, & \rho_i(r, o) > \rho_0 \end{cases} \quad (8)$$

其中 $0 < n \leq 1$ ，此时斥力的表达式如下:

$$F_{rep} = -\Delta U_{rep}(\rho(r, o)) = \begin{cases} F_{rep1} + F_{rep2} \\ 0 \end{cases} \quad (9)$$

下面进行证明，由于乘以此因子后引力和斥力表示如下:

$$\begin{cases} F_{rep1} = \eta \left( \frac{1}{\rho_i(r, o)} - \frac{1}{\rho_0} \right) \frac{1}{\rho_0^2} \frac{\partial \rho_0}{\partial x} \rho(r, g)^n \\ F_{rep2} = -\frac{1}{2} \eta \left( \frac{1}{\rho_i(r, o)} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2 \frac{\partial \rho(r, g)^n}{\partial x} \end{cases} \quad (10)$$

其中  $F_{rep1}$  的方向由障碍物指向机器人,  $F_{rep2}$  指向目标点。当水下机器人向目标点趋近,  $\rho(r, g)$  无限趋于零, 此时斥力  $F_{rep1}$  趋于 0。因此水下机器人此时方向为指向目标点方向, 不会陷入局部最小问题。

考虑到水下机器人与障碍物之间的相对速度, 速度分量产生的势场如下:

考虑到水下机器人与障碍物之间的相对速度, 速度分量产生的势场如下:

$$U_{repv}(\rho_i(r, o)) = \begin{cases} \lambda \sum_{i=1}^N |V(t) - V_{obsi}(t)| \sin \delta_i, & \rho_i(r, o) \leq \rho_0 \\ 0, & \rho_i(r, o) > \rho_0 \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $\lambda$  为速度势场因子是一个常数系数,  $\delta$  为机器人与障碍物的相对速度  $V(t) - V_{obsi}(t)$  与距离斥力分量的  $F_{reps}$  的夹角。几个变量之间关系如下图 3 所示。

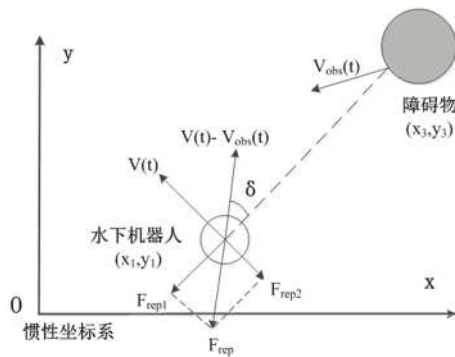


图 3 二维空间中的斥力关系

水下机器人受到由于相对速度产生的势场  $U_{reps}$  的总合力  $F_{repvs}$  如下:

$$F_{repvs} = \sum_{i=1}^N F_{repv}(\rho_i(r, o)) = -\sum_{i=1}^N \nabla U_{repvs}(\rho_i(r, o)) \quad (12)$$

因此, 在这个二维空间中, 合成的总势场  $U$  与合成总势场力  $F$  如下:

$$\begin{cases} U = U_{att}(r, g) + U_{reps}(\rho_i(r, o)) + U_{repvs}(\rho_i(r, o)) \\ F = -\nabla U_{att}(r, g) - \nabla U_{reps}(\rho_i(r, o)) - \nabla U_{repvs}(\rho_i(r, o)) \end{cases} \quad (13)$$

真实水域环境中, 水流的方向和大小将改变水下机器人的运动状态, 降低避障精度。因此本文将水流速度和水下机器人速度的合速度视为控制量。

图 4 中坐标原点代表简化的水下机器人,  $S$  为水下机器人此时位置指向目标点位置的矢量, 即此时的最优路径,  $\beta_2$  为矢量  $S$  与  $x$  坐标轴的夹角,  $V(t)$  为水下机器人此时的移动速度, 且  $|V(t)|$  已知,  $\beta_1$  为水下机器人速度  $V(t)$  与矢量  $S$  的夹角,  $V_c(t)$  是水流的速度矢量,  $\beta_3$  为水流速度矢量与  $x$  轴的夹角。

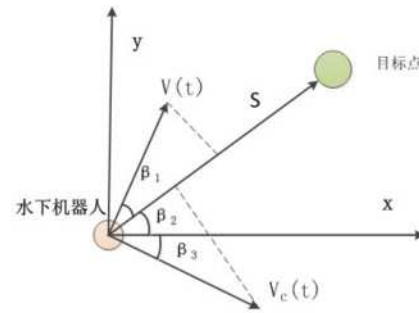


图 4 速度的合成

对水下机器人速度矢量分解为垂直于  $S$  方向的速度分量  $V_d(t)$ , 其大小如下:

$$|V_d(t)| = |V(t)| \sin \beta_1 \quad (14)$$

同样对水流速度矢量分解为垂直于  $S$  方向的速度分量  $V_{cd}(t)$ , 其大小如下:

$$|V_{cd}(t)| = |V_c(t)| \sin(\beta_2 + \beta_3) \quad (15)$$

要求水下机器人速度与水流速度的合速度沿着  $S$  方向, 也就是要求它们在垂直于  $S$  方向无速度合成量, 因此  $V_d(t)$  与  $V_{cd}(t)$  大小相等, 方向相反, 可得下式:

$$|V(t)| \sin \beta_1 = |V_c(t)| \sin(\beta_2 + \beta_3) \quad (16)$$

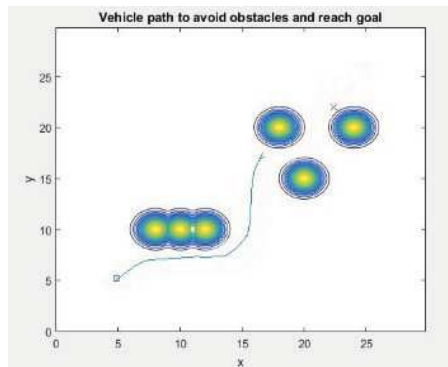
其中  $\beta_2$  可以从声呐探测数据中得到,  $V_c(t)$  的大小和方向可在水下机器人潜入海洋前预先测试得到, 而  $V(t)$  为水下机器人在本节中假设其保持大小恒定, 因此  $\beta_2$  可以通过上式求得, 即此时水下机器人艏向角为  $\beta_1 + \beta_2$ 。

因此, 在水流环境下改进人工势场路径规划的模型如下式子所示。

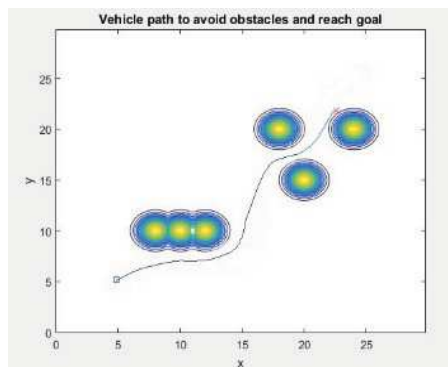
$$\begin{cases} U = U_{att}(r, g) + U_{reps}(\rho_i(r, o)) + U_{repvs}(\rho_i(r, o)) \\ \beta_1 = \arcsin\left(\frac{|V_c(t)| \sin(\beta_2 + \beta_3)}{|V(t)|}\right) \end{cases} \quad (17)$$

### 三、避障系统的模拟仿真实验

利用 *Matlab* 构建二维平面内水下机器人在无水流环境下的避障仿真实验。其中, 水下机器人的起始位置坐标为 (5, 5), 目标点位置坐标为 (22, 23)。在水下机器人和目标点之间, 六个障碍物随机分布。经过多次实验调试调参, 当取得  $m = n = 2$ ,  $\xi = 3.25$ ,  $\eta = 0.85$ ,  $\lambda = 0.25$  时仿真效果较好, 并设水下机器人的移动速度大小为  $V(t) = 0.3m/s$ 。则在无水流的静态环境下采用传统人工势场法的路径规划效果如图 5 (a), 而基于改进的人工势场路径规划效果如图 5 (b) 所示。因此可以看出, 当目标点与障碍物相距较近, 传统人工势场会陷入局部最小问题无法达到目标点, 而改进后的人工势场法能够解决这个问题。



(a) 采用传统人工势场



(b) 采用改进的人工势场

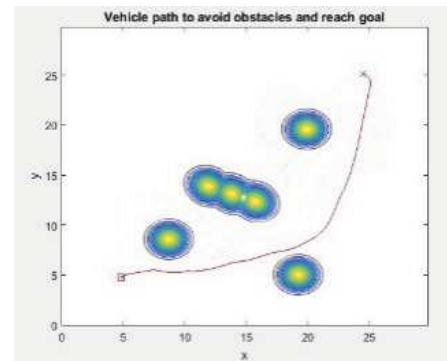
图5 没有水流情况下的水下机器人避障仿真实验

由于水流变换复杂多变,难使用数学模型精确描述其流动规律。但水流在某一时间段某片固定的区域范围内是较稳定的。为简化问题,假设水下机器人在特定的时间和固定范围内进行水下作业,即将水流的影响简化为一个大小和方向恒定的力的作用。故模拟一个大小方向恒定的力作为水流,进行水下机器人在水流环境下的避障仿真实验。

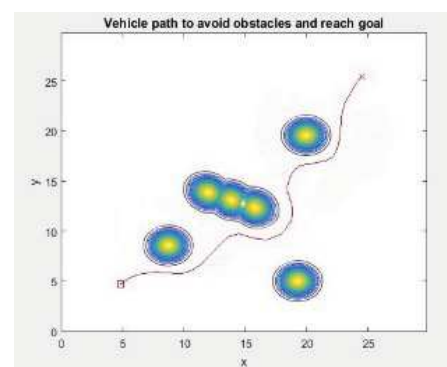
图6为加入常值水流模型的环境下(水流方向沿着x轴正向,流速大小为 $0.2m/s$ 的Matlab仿真结果图,起始点位置不变,目标点为(25, 25),六个障碍物选择随机分布,水下机器人移动速度依然保持 $0.3m/s$ 。其中图6(a)为传统人工势场的仿真效果图,由于没有考虑水流的影响运动发生了偏移,虽能够到达目标点但是路程较长。图6(b)为采用了速度合成的改进人工势场法的仿真结果,可以看出水下机器人沿着朝向目标点的位置行驶,水流对运动过程的干扰作用被削弱,避障路程较短较合理。

#### 四、避障系统的水池实验

在室内水池中放置一块大小为 $1.2 \times 1.8 \times 0.3$ 的长木板作为障碍物,设置水下机器人行驶目标点,并默认避障距离为0.6米。接着将声呐获取到的障碍物位置信息构建地图,使用速度合成的改进人工势场方法规划该地图下的避障路线。令水下机器人前进速度保持不变,可求出在该避障路线下水下机器人的艏向在不同时间的具体数



(a) 传统人工势场法



(b) 改进的速度合成人工势场法

图6 加入水流模型后的仿真结果

值。将这些数值按一定时间间隔输入水下机器人的艏向控制器,进行水池避障实验。

#### 五、结束语

本文利用声呐传感器搭建水下机器人避障系统,采用了改进的人工势场方法,解决目标点与障碍物相距过近导致的局部最小问题,并且利用速度合成方法削弱水流对运动过程的干扰,实现水下机器人在恒常水流下最小代价的实时避障。最后,通过仿真实验和水池环境试验中验证了水下机器人避障系统的可行性。

#### 参考文献:

- [1]张健,杨天华,李子燃.水下机器人应用于海事业务的前景与挑战[J].中国海事,2021(05):61-64. DOI: 10.16831/j.cnki.issn1673-2278.2021.05.018.
- [2]任忠涛,王业山,李增辉,方婧宜,彭志豪.小型水下机器人的研究发展及其应用现状[J].新型工业化,2019,9(10):36-40. DOI: 10.19335/j.cnki.2095-6649.2019.10.009.
- [3]肖晴晗.水下机器人研究现状及趋势分析[J].产业创新研究,2021(20):25-27.
- [4]王迪,李彩虹,郭娜,高腾腾,刘国名.改进人工势场法的移动机器人局部路径规划[J].山东理工大学学报(自然科学),2021,35(03):1-6. DOI: 10.13367/j.cnki.sdgc.2021.03.001.