

文章编号: 1002-0446(2007)01-0088-04

## 基于三维速度势场的 AUV 局部避碰研究\*

洪 晔, 边信黔

(哈尔滨工程大学自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘 要:** 以势场方法的思想为出发点, 提出一种基于速度势场的 AUV 局部避碰仿真方法. 根据 AUV 的特点建立了空间碰撞危险区域和由水平面速度势场和垂直面速度势场组成的三维速度势场. 该方法较好地利用了相对速度的信息. 仿真实验证明此方法可以使 AUV 在水下多运动障碍物的环境中得到较好的局部避碰效果, 为今后的海试打下了很好的基础.

**关键词:** 自治式水下机器人; 局部避碰; 速度势场; 运动障碍物

**中图分类号:** TP24      **文献标识码:** B

## An AUV Obstacle-Avoidance Method Based on Three-dimensional Velocity Potential Field

HONG Ye, BIAN Xin-qian

(Automation Institute, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract** A local obstacle avoidance approach for AUV based on velocity potential field is presented with the idea of potential methods. According to the characteristics of AUV, the collision field and three-dimensional velocity potential field are built and the latter is composed of horizontal and vertical velocity potential fields. This method makes good use of the relative velocity of AUV. The simulation results verify that it provides the AUV with local collision-avoiding ability in a dynamic world with multiple moving obstacles and lays a firm foundation for the ocean test.

**Keywords** AUV (Autonomous Underwater Vehicle); local obstacle avoidance; velocity potential field; moving obstacle

### 1 引言 (Introduction)

避碰问题一直是 AUV (Autonomous Underwater Vehicle) 运动规划中的一个基本问题, 由于水下环境的复杂性, 不仅要考虑静止的障碍物, 还应考虑移动障碍物. 局部的避碰较多地使用基于势场的方法<sup>[1]</sup>. 势场法在解决静态障碍物的局部避碰问题时, 具有实时性好、比较实用的优点, 但当障碍物为运动障碍物时, 其效果并不理想, 会导致 AUV 无效运动, 其典型的运动是运动障碍将 AUV 推离其运动轨迹, 而实际二者并不会碰撞. 我们认为, 这种无效运动的产生是由于势场一般是建立在 AUV 的构型空间上, 且其避碰决策只使用障碍物的距离信息, 而没有使用障碍物的速度信息. 实际上, AUV 的避碰规划应该含有对未来危险的回避, 因此首先要对碰撞的危险做出预测, 然后再进行有效的运动规划.

因此, 一些学者在对移动障碍物的局部避碰问题的研究中, 着重研究如何利用速度等障碍的运动信息, 并提出了不同的决策方法. Nan<sup>[2,3]</sup>以每个观察周期为感知决策周期, 使用随机模型预测运动障碍物在该周期的运动, 对其可能到达的空间点设定概率值, 在此基础上建立局部的人工势场, 实现局部避碰. Ko<sup>[4]</sup>将 AUV 和障碍物之间的相对速度在二者位置连线上的投影值作为加权因素, 对二者的实际距离进行修改, 建立虚距离的概念, 以虚距离为变量建立势场. Tsubouchi<sup>[5,6]</sup>使用虚阻抗的方法, 其中借用阻尼的概念, 利用 AUV 和障碍物之间的相对速度产生阻尼力. 该阻尼力作用在相对速度方向上, 与距离成正比, 而与相对位置无关. 尽管这些方法都以不同的方式利用了速度信息, 但其方法都是以基于位置

\* 收稿日期: 2006-04-05

的方法为基础的,即将速度信息通过某种方式转化为位置信息,或者用速度信息对位置信息进行加权修正,然后进行基于位置的避碰决策.与之不同,本文将直接利用相对速度信息,根据 AUV 的动态环境,利用相对速度的极坐标,建立由水平面速度势场和垂直面速度势场组成的三维速度势场,在 AUV 遇到障碍物时通过调整速度矢量实现局部避碰.

### 2 算法描述 (Description of the algorithm)

在移动障碍物的避碰过程中,对障碍物的尺寸进行膨化处理, AUV 对膨化过的障碍物进行避碰<sup>[7]</sup>.如图 1 所示: AUV ( $R$ ) 作为点处理,移动障碍物  $O$  经过膨化处理呈球状,球心为  $O$  点(球半径  $OA$  根据障碍物方位和速度信息定义),以垂直于  $RO$  (AUV 与障碍物的空间距离)连线的直径圆  $OAB$  为底面、 $RO$  为高,形成圆锥形碰撞危险区域. AUV 相对障碍物的空间速度为  $V_{RO}$ ,若  $V_{RO}$  落在圆锥  $R-OAB$  中,即  $RO \cap (R-OAB) \neq \emptyset$  则表示构成危险,  $V_{RO}$  距离  $RO$  越近则危险度越大.改变  $V_{RO}$  的大小和方向都将影响碰撞危险程度.避碰的原则:通过不断地改变运动速度和方向,使  $V_{RO}$  逃离圆锥形碰撞危险区域,绕过障碍物.

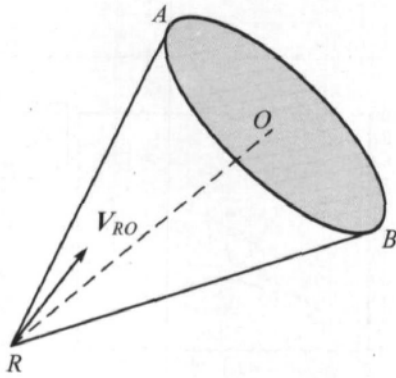


图 1 相对速度和碰撞区域示意图

Fig 1 Relative velocity and collision field

### 3 速度势场的建立 (The design of velocity potential field)

由于 AUV 工作环境的特殊性,需要建立相应的水下三维速度势场.本文将上述碰撞危险区域划分为水平面和垂直面,把 AUV 和障碍物的空间速度  $V_R$ 、 $V_O$  和  $V_{RO}$  分解为  $V_{Rxy}$ 、 $V_{Oxy}$ 、 $V_{ROxy}$  (水平面)和  $V_{Rxz}$ 、 $V_{Oxz}$ 、 $V_{ROxz}$  (垂直面),并将所有的速度矢量用极坐标  $(V, \theta)$  表示,其中  $V$  为  $V$  的模,  $\theta$  为  $V$  与  $P$  的夹角.由此,把三维的空间碰撞危险区域转化为水平面

和垂直面碰撞区域,如图 2 所示.水平面危险区域为  $R-K1-O-K2$  相对速度  $V_{ROxy}$  落在此区域内,则认为存在碰撞危险;垂直面危险区域为  $R-L1-O-L2$  同理,  $V_{ROxz}$  在此区域,存在危险.

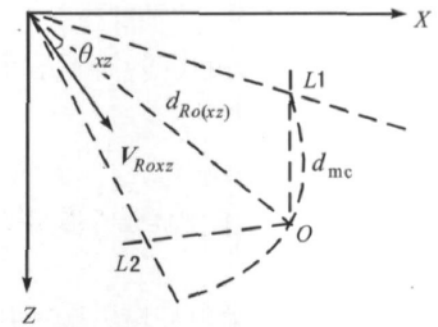
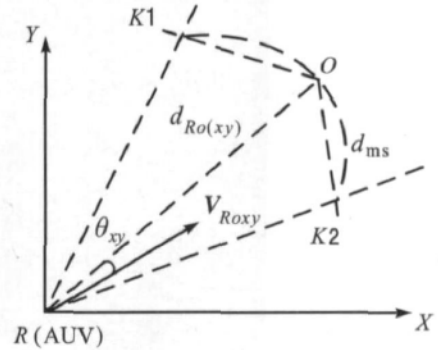


图 2 碰撞危险区域平面划分

Fig 2 Division of collision field

在  $(V, \theta)$  上建立水平面速度势场  $U_s$  和垂直面速度势场  $U_v$ ;  $U_s$  表示 AUV 在水平面的速度势场,代表 AUV 在水平面的碰撞危险度.

$$U_s = \begin{cases} U_{ds} \cdot U_{ls} & \text{if } \theta_{xy} < \theta_s \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

其中:

$$\sin \theta_s = \frac{d_{ms}}{d_{Ro(xy)}} \quad (2)$$

$d_{Ro(xy)}$  是 AUV 到移动目标  $O$  的水平面距离,  $d_{ms}$  为 AUV 与移动目标之间允许的最近距离;  $\theta_s$  是  $V_{Roxy}$  与  $RO$  的夹角.

$U_s$  由  $U_{ds}$  和  $U_{ls}$  组成, 见式 (3)、(4).

$$U_{ds} = \frac{1}{d_{Ro(xy)}} \cdot \left( \frac{1}{|\sin \theta_{xy}|} - \frac{1}{\sin \theta_s} \right) \quad (3)$$

$$U_{ls} = \exp\left(-\frac{d_{Ro(xy)}}{|V_{Roxy}| \cos \theta_{xy}}\right) \quad (4)$$

其中,  $U_{ds}$  用于衡量 AUV 与目标之间的最短距离,  $U_{ls}$

是对碰撞发生时间的衡量. 当  $U_s > 0$  时, 表示水平相对速度矢量处于碰撞区域内;  $U_s$  越大表示碰撞危险程度越高. 根据  $U_s$  的大小, AUV 应做出相应的决策, 使  $U_s$  减小.

同理, 我们可以得到垂直面速度势场  $U_c$  的表达式:

$$U_c = \begin{cases} U_{dc} \cdot U_{lc} & \text{if } \theta_{xz} < \theta_c \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

其中:

$$\sin\theta_c = \frac{d_{mc}}{d_{Ro(xz)}} \quad (6)$$

$$U_{dc} = \frac{1}{d_{Ro(xz)}} \cdot \left( \frac{1}{|\sin\theta_{xz}|} - \frac{1}{\sin\theta_c} \right) \quad (7)$$

$$U_{lc} = \exp\left(-\frac{d_{Ro(xz)}}{|\mathbf{V}_{Ro(xz)}| \cos\theta_{xz}}\right) \quad (8)$$

若  $U_{ds}$  和  $U_{ls}$  都大于 0 由式 (9) 得到最终的合成速度势场  $U$ :

$$U = U_s \oplus U_c \quad (9)$$

其中: “ $\oplus$ ” 为合成算子, 本文中优先考虑水平面速度势场的影响.

在避碰过程中, 我们采用势场法算法中通用的方法, 使  $U_{ds}$  和  $U_{ls}$  沿其负梯度方向变化, 因负梯度方向是  $U$  下降最快的方向. 因此, 分别求  $U_{ds}$  和  $U_{ls}$  的梯变:

$$\frac{\partial U_s}{\partial \mathbf{V}_{Roxy}} = \frac{1}{\mathbf{V}_{Roxy}^2 \cdot \cos\theta_s} \cdot \left( \frac{1}{\sin\theta_s} - \frac{1}{\sin\theta_y} \right) \cdot \exp\left(-\frac{d_{Ro(xy)}}{\mathbf{V}_{Roxy} \cdot \cos\theta_s}\right) \quad (10)$$

$$\frac{\partial U_c}{\partial \mathbf{V}_{Ro(xz)}} = \frac{1}{\mathbf{V}_{Ro(xz)}^2 \cdot \cos\theta_c} \cdot \left( \frac{1}{\sin\theta_c} - \frac{1}{\sin\theta_z} \right) \cdot \exp\left(-\frac{d_{Ro(xz)}}{\mathbf{V}_{Ro(xz)} \cdot \cos\theta_c}\right) \quad (11)$$

我们将势场负梯度方向作为运动障碍物的相对速度矢量在水平面  $X$ - $Y$  和垂直面  $X$ - $Z$  中的期望增量方向, 通过设定增量长度, 得到期望的相对速度增量矢量  $\Delta \mathbf{V}_{Roxy}$  和  $\Delta \mathbf{V}_{Ro(xz)}$ . 由于障碍物是不受控制的, 所以  $\Delta \mathbf{V}_{Roxy}$  和  $\Delta \mathbf{V}_{Ro(xz)}$  只能由 AUV 的速度变化实现.

当有多个运动障碍物时, 可将多个增量矢量相加, 合成速度合矢量.

### 4 仿真示例 (Simulation example)

为了说明本文建立的三维速度势场的有效性,

下面给出 AUV 遇到运动障碍物  $A$ 、 $B$  时的仿真示例. 在仿真中, AUV 为圆形全方位移动机器人.

把 AUV 的速度分解为  $X$ - $Y$  (水平) 方向和  $X$ - $Z$  (垂直) 方向, 并建立  $X$ - $Y$  和  $X$ - $Z$  平面. 如图 3、4 所示: 图 3 分别为仿真开始后  $t=2$  s、 $t=16$  s 和  $t=24$  s 时 AUV 与障碍物  $A$  和  $B$  的水平面轨迹曲线, 其中虚线部分为 AUV 在没有障碍情况下的水平航迹; 图 4 分别为仿真开始后  $t=2$  s、 $t=16$  s 和  $t=24$  s 时 AUV 与障碍物  $A$  和  $B$  的垂直面轨迹曲线, 其中虚线部分为 AUV 在没有障碍情况下的垂直航迹. 可以清楚地看到, 通过改变 AUV 相对速度矢量, 能够达到很好的避碰效果.

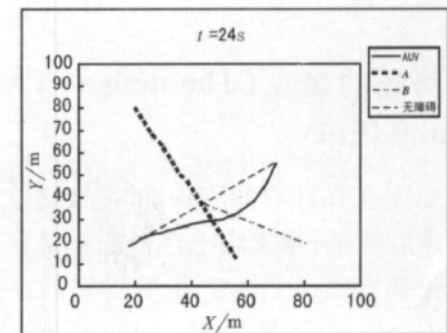
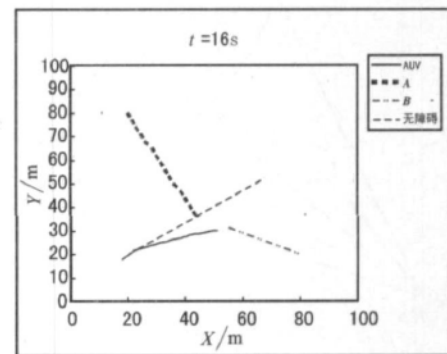
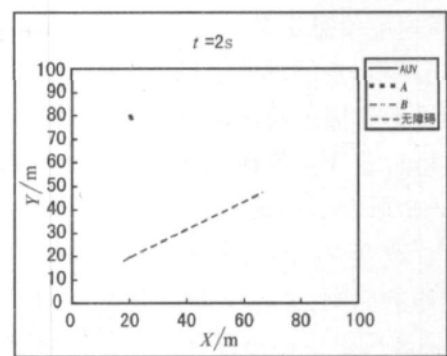


图 3 AUV 与障碍物的水平面  $X$ - $Y$  仿真曲线

Fig 3 Simulation curves between AUV and targets on  $X$ - $Y$

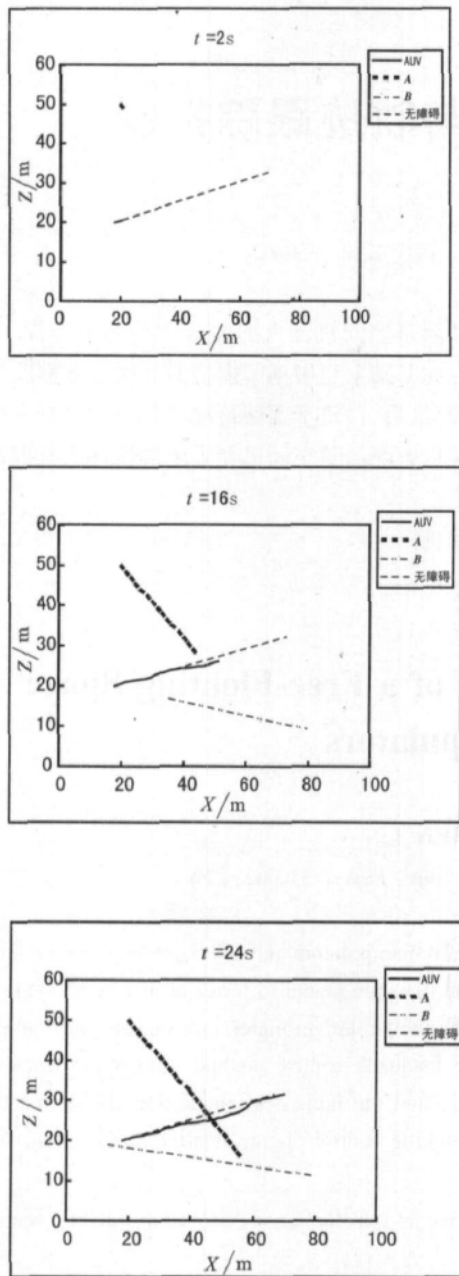


图 4 AUV 与障碍物的垂直面 X-Z 仿真曲线

Fig 4 Simulation curves between AUV and targets on X-Z

### 5 结论 (Conclusion)

本文提出了一种基于三维速度势场理论的 AUV

局部避碰方法, 以速度势场的形式充分地利用了相对速度的信息, 因此可以较好地实现对移动障碍物局部避碰. 同时, 由于该算法是利用相对速度推导出的, 因而对于运动或静止的障碍物都适用.

### 参考文献 (References)

- [ 1 ] Cao Y U, Fukunaga A S, Kahng A B, *et al*. Cooperative mobile robotics antecedents and directions[A]. Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems [C]. Piscataway, NJ USA: IEEE, 1995. 226-234.
- [ 2 ] Nam Y S, Lee B H, Ko N Y. An analytic approach to moving obstacle avoidance using an artificial potential field[A]. Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems[C]. Piscataway, NJ USA: IEEE, 1995. 482-487.
- [ 3 ] Nam Y S, Lee B H, Kim M S. View time based moving obstacle avoidance using stochastic prediction of obstacle motion[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. Piscataway, NJ USA: IEEE, 1996. 1081-1086.
- [ 4 ] Ko N Y, Lee B H. A viability measure in moving obstacle avoidance problem and its use for robot motion planning[A]. Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems[C]. Piscataway, NJ USA: IEEE, 1996. 1296-1303.
- [ 5 ] Tsubouchi T, Kuramochi S, Arimoto S. Iterated forecast and planning algorithm to steer and drive a mobile robot in the presence of multiple moving objects[A]. Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems[C]. Piscataway, NJ USA: IEEE, 1995. 33-38.
- [ 6 ] Tsubouchi T, Arimoto S. Behavior of a mobile robot navigated by an "iterated forecast and planning" scheme in the presence of multiple moving obstacles[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Piscataway, NJ USA: IEEE, 1994. 2470-2475.
- [ 7 ] 张凤, 谈大龙. 一种基于相对坐标系下移动机器人动态实时避碰的新方法[J]. 机器人, 2003, 25(1): 31-35.

### 作者简介:

洪 晔 (1979-), 女, 博士生. 研究领域: 仿真技术与智能控制技术.

边信黔 (1941-), 男, 教授, 博士生导师. 研究领域: 船舶动力定位技术和水下潜器控制技术.