

一种欠驱动AUV的三维实时避碰方法

徐红丽

(中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110016)

摘要: 针对以测距声纳为避碰传感器的一类欠驱动型 AUV, 提出了一种水平面和垂直面相结合的三维实时避碰方法. 根据测距声纳和欠驱动 AUV 的特殊性, 首先从运动规划和路径规划 2 个层次提出了 AUV 混合型实时避碰结构, 并分别设计了基于事件反馈监控的避碰自动机和基于免疫遗传的局部路径规划算法. 多种典型障碍场景的半物理仿真实验表明, 论文所提方法能够实现 AUV 安全、稳定的三维避碰过程.

关键词: 避碰控制; 自治水下机器人; 有限自动机; 免疫遗传算法

中图分类号: TP2.24

文献标识码: A

A 3D Real-time Obstacle Avoidance Method for an Under-actuated AUV

XU Hongli

(State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: Aiming at an under-actuated autonomous underwater vehicle (AUV) with ranging sonar as its obstacle avoidance sensor, this paper presents a 3D real-time obstacle avoidance method combining horizontal plane with vertical plane. Firstly a hybrid real-time obstacle avoidance structure is designed from the view of motion planning and path planning levels based on the sonar's and AUV's particularities. Then an obstacle avoidance automata based on event feedback supervision and an immune genetic algorithm for generating local path are proposed respectively. A large number of tests are carried out on a semi-physical simulation platform. The simulations with diverse typical obstacle scenarios demonstrate that the presented method can make AUV avoid unknown obstacles safely and stably in 3D space.

Keywords: obstacle avoidance; autonomous underwater vehicle; finite state automata; immune genetic algorithm

1 引言 (Introduction)

AUV 要在复杂未知环境中自主作业, 实时避碰是一种必不可少的自我保护能力. 同时, 能自动检测、识别、避开障碍也是 AUV 拥有“智能”的重要体现. 因此, 无论从实际应用前景还是从理论研究意义方面看, AUV 实时避碰方法都具有重要的研究价值.

能使 AUV 像鱼儿一样自主地规避障碍一直是研究者追求的理想目标. 但是, 现有研究成果多倾向于 AUV 单个平面 (水平面^[1-2]或垂直面^[3-5]) 的实时避碰方法研究, 而忽略了 AUV 是在三维空间运动的载体. AUV 不像陆上和爬行机器人那样可以采用“先停下再转向”的策略实现障碍规避. 对于 AUV, 特别是由主推进器和方向舵组成运动驱动单元的欠驱动型 AUV, 悬停和原地转向等行为是难以实现的, 需要复杂的行为组合才能达到绕过障碍的目的.

Zapata^[6]针对类鱼雷型 AUV 的海底跟踪和避碰问题, 基于 DVZ (deformable virtual zone) 理论提出了反射控制率. Kawano^[7]针对非完整型 AUV 提出了基于强化学习的运动规划算法, 用于强海流环境下的实时避碰规划. 洪晔^[8]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合成的三维速度势场, 实现了对移动障碍物的局部避碰. 本文作者针对一类具有远距离航行能力的欠驱动 AUV, 提出了基于模糊控制的水平面和垂直面避碰控制器设计^[9-10]. 但总体而言, 针对未知复杂环境下的 AUV 实时避碰问题, 没有统一的或完美无缺的解决方案.

本文在原有模糊避碰控制器的基础上, 从运动规划和路径规划 2 个层次研究了三维实时避碰的实现问题. 在运动规划层, AUV 要对视野内的障碍作出即时、准确的响应; 主要研究多种实时避碰行为的融合和切换问题. 由于实时避碰行为只考虑当前状态而不考虑历史信息、存在“短视”缺陷, 需要在更高层的路径规划层建立实时规划算法, 负责根据已获得的在线地图, 规划出远离障碍的优选路径. 为此, 本文研究了基于免疫遗传算法的实时路径规划算法. 最后, 通过半物理仿真实验证明了所提方法的可行性和有效性.

2 混合型实时避碰结构 (A hybrid real-time obstacle avoidance architecture)

本文的研究对象——一类欠驱动 AUV, 采用 5

个单波束回声测距仪（简称测距声纳）作为环境传感器，其性能参数和布置方案参见文[9]。受自身特性和水声环境影响，测距声纳输出数据具有较大的不确定性。因此要成功躲避障碍，首要的任务是从多个测距声纳数据中实时提取可靠的障碍信息并产生在线地图。

其次，欠驱动型 AUV 操纵性的约束也大大限制了避障行为的设计：它不能紧急停车也不能原地转向，必须在航行机动中迅速选择避碰行为。考虑上述因素，本文提出该 AUV 的混合型实时避碰结构，如图 1 所示。

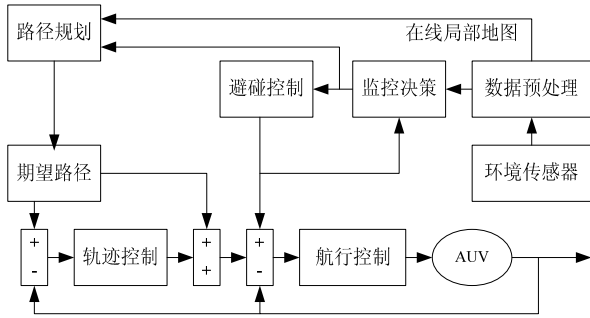


图 1 混合型避碰控制总体结构

Fig.1 A hybrid obstacle avoidance structure

实时避碰系统由数据预处理、监控决策、避碰控制和路径规划 4 部分组成。数据预处理模块负责对避碰声纳的采样值进行一致性检验，判断其值的真伪。监控决策模块是一个集经验知识和规则于一身的专家系统，负责在各种避碰行为之间实时切换。避碰控制模块包含水平面和垂直面 2 个避碰控制器，分别采用调整航向和调整深度的策略达到在水平面和垂直面避开障碍物的目的。避碰控制将为累积环境信息和路径规划赢得时间。路径规划负责根据在线地图搜索满足特定适应性函数的优化路径，为 AUV 彻底摆脱障碍提供有效方案。本文重点研究监控决策和路径规划 2 个模块的实现方法。

3 基于事件反馈监控的避碰自动机 (The obstacle avoidance automata based on event feedback supervision)

水下机器人运动是三维空间的非线性运动，各自由度间存在较强的耦合作用。避碰控制模块输出的仅仅是水平面或垂直面的避碰行为，要实现连续的三维避碰过程必须将 2 类平面避碰的行为有机地结合在一起。本文把 AUV 避碰过程看作由离散事件驱动、并由离散事件按照一定运行规则相互作用来控制状态演化的一类离散事件动态系统，并用确定性有限状态自动机来表示（如图 2）。

基于事件反馈的避碰监控器 M 表示为：

$$M = (F, \phi)$$

$$F = \{X, \Sigma_m, \delta_m, x_0, X_m\}$$

其中， F 是一个标准的有限自动机，也可以称其为监控器自动机，其状态转移由 Σ_m 中的事件驱动。 X 是 F 的有限状态集， Σ_m 是事件的有限字符集， δ_m 是状态转移函数， x_0 是 F 的初始状态， X_m 是 F 的目标状态。 ϕ 为 F 的状态集 X 到控制模式集 Γ 的一个映射，即 $\phi: X \rightarrow \Gamma$ 。

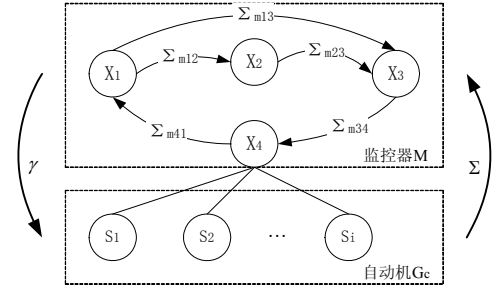


图 2 基于事件反馈监控的避碰自动机

Fig.2 The obstacle avoidance automata based on event feedback supervision

监控器自动机 F 由 4 个状态组成： X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 ，各状态和事件的具体定义参见表 1， F 的字母表 Σ_m 为：

$$\Sigma_m = \{\Sigma_{m12}, \Sigma_{m23}, \Sigma_{m13}, \Sigma_{m34}, \Sigma_{m41}\},$$

$$\Sigma_{m12} = \{e_{m1}\}, \Sigma_{m13} = \{e_{m3}, e_{m4}\}, \Sigma_{m23} = \{e_{m2}\},$$

$$\Sigma_{m34} = \{e_{m5}\}, \Sigma_{m41} = \{e_{m6}\}.$$

有限自动机 F 的状态转移由字母表 Σ_{m12} 、 Σ_{m13} 、 Σ_{m23} 、 Σ_{m34} 和 Σ_{m41} 控制。当 F 处于 X_1 空闲状态时，控制模式集 Γ 可以描述为： $\forall \Sigma_{ij} \in \Sigma, i=1, \dots, 8, j=1, \dots, 8$ ，当 $\delta(\sigma, \Sigma_{ij})!$ 时， $\gamma(\sigma)=1$ ； $\forall \Sigma_{ij} \in \Sigma, i=0, 1, 9, j=0, 1, 9$ ，当 $\delta(\sigma, \Sigma_{ij})!$ 时， $\gamma(\sigma)=0$ 。

当 F 处于 X_2 状态时，自动机 F 将按照用户设定的流程执行倒车行为。控制模式 Γ 为： $\forall \Sigma_{i9} \in \Sigma, i=0, 1, \dots, 8$ ，当 $\delta(\sigma, \Sigma_{i9})!$ 时， $\gamma(\sigma)=1$ ； $\forall \Sigma_{ij} \in \Sigma, i=0, 1, \dots, 8, 9, j=0, 1, \dots, 8$ ，当 $\delta(\sigma, \Sigma_{ij})!$ 时， $\gamma(\sigma)=0$ 。

当 F 处于 X_3 状态时，将按照下一节设计的实时路径规划算法进行在线路径规划。控制模式 Γ 为： $\forall \Sigma_{i0} \in \Sigma, i=1, \dots, 8, 9$ ，当 $\delta(\sigma, \Sigma_{i0})!$ 时， $\gamma(\sigma)=1$ ； $\forall \Sigma_{ij} \in \Sigma, i=0, 1, \dots, 8, 9, j=1, \dots, 8, 9$ ，当 $\delta(\sigma, \Sigma_{ij})!$ 时， $\gamma(\sigma)=0$ 。

X_4 属于 F 的过渡状态，即等待受控自动机进行状态重置（强制返回 S_1 状态）时， ϕ 禁止 G_c 中部分事件发生： $\forall \Sigma_{ij} \in \Sigma, i=0, 1, \dots, 8, 9, j=0, 2, 3, \dots, 9$ ，当 $\delta(\sigma, \Sigma_{ij})!$ 时， $\gamma(\sigma)=0$ ；同时允许另一部分事件发生： $\forall \Sigma_{i1} \in \Sigma, i=0, 2, 3, \dots, 9$ ，当 $\delta(\sigma, \Sigma_{i1})!$ 时， $\gamma(\sigma)=1$ 。

受控有限自动机 G_c 表示为：

$$G_c = (Q, \Gamma \times \Sigma, \delta_c, q_0, Q_m)$$

设 Σ 的子集 Σ_c 和 Σ_u 分别表示受控事件集和非受控事件集, 则 $\Gamma = \{0,1\}^{\Sigma_c}$ 为定义在受控事件集 Σ_c 上的布尔函数的全体, δ_c 为受控事件的状态转移函数:

$$\delta_c(\gamma, \sigma, q) = \begin{cases} \delta(\sigma, q) & \text{如果 } \delta(\sigma, q) \neq 1 \text{ 和 } \gamma(\sigma) = 1 \\ \text{no meaning} & \text{其他} \end{cases}$$

受控自动机 G_c 的详细设计参看文[9-10].

4 基于免疫遗传的局部路径规划方法 (An immune genetic algorithm for local path planning)

局部路径规划是对实时避碰行为的补充, 当 AUV 在障碍前不断地重蹈覆辙或进入陷阱区域而长时间无法避开障碍时, 监控器将转入 X_3 状态进行局部路径规划. 局部路径规划生成的路径成为受控自动机 G_c 新的目标路径, 继续开始下一次的轨迹跟踪运动.

免疫遗传算法将待求解的问题对应为抗原, 将问题的解对应为抗体, 模拟生物体免疫应答机理改善遗传算法的搜索性能, 特别适用于解决局部路径规

划这类多目标优化问题. 免疫机理与遗传算法结合的形式有多种类型, 本文以遗传算法为主、引入抗体识别抗原的免疫机制, 形成一种新的免疫遗传算法, 其基本流程如图 3 所示.

表 1 有限自动机 F 的状态和事件

Tab.1 States and events of the automata F

符号	含义
X_1	空闲
X_2	倒车
X_3	实时路径规划
X_4	受控自动机重置
e_{m1}	AUV 无航速、且正前方向与障碍相对距离小于最低安全值
e_{m2}	倒车结束, AUV 系统工作正常
e_{m3}	连续处于避碰的时间过长
e_{m4}	有向闭链在一定时间内不断出现
e_{m5}	实时路径规划成功生成新的路径
e_{m6}	G_c 处于 S_1 状态

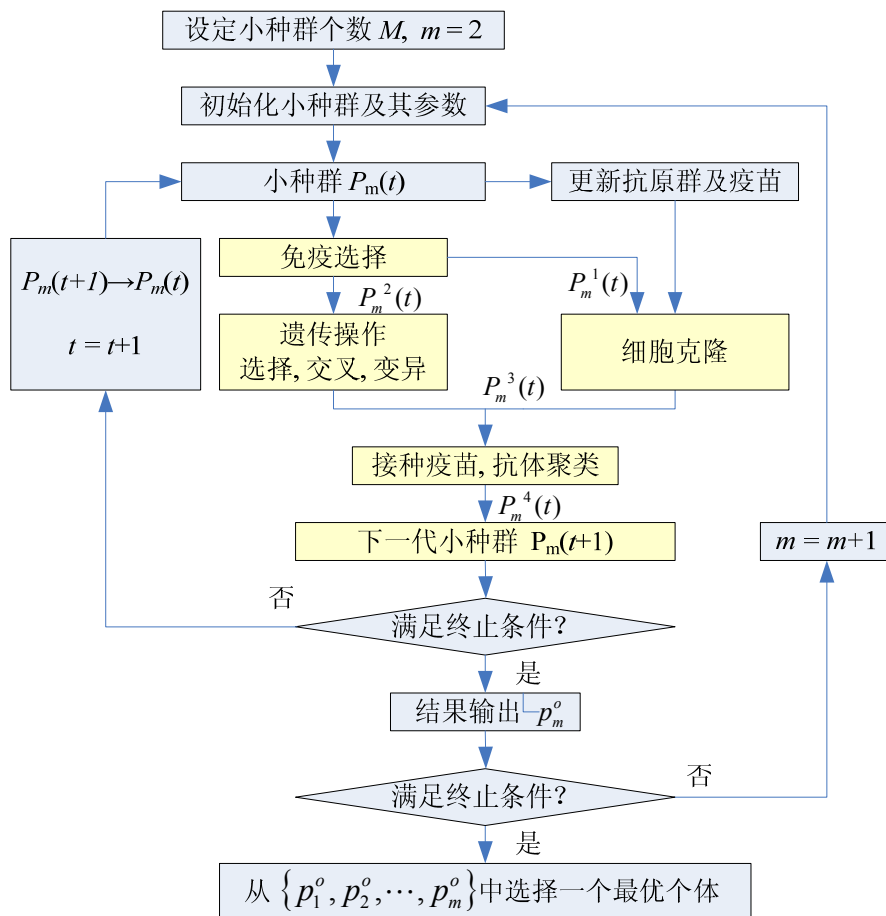


图 3 免疫遗传算法流程

Fig.3 The processes of the immune genetic algorithm

首先，引入以路径段个数为标准划分种群的小生境技术；将种群 $P(t)$ 划分为 $M(M > 2)$ 个小种群，第 m 个小种群 $P_m(t)$ 中任意个体的路径段个数为 m ：

$$P(t) = \{P_1(t), P_2(t), \dots, P_m(t), \dots, P_M(t)\}, \quad m = 1, 2, \dots, M$$

然后，依次对每个小种群实施进化操作。免疫选择以抗体亲和力为指标，将小种群 $P_m(t)$ 分为 2 部分 $P_m^1(t)$ 和 $P_m^2(t)$ ；前者应用遗传操作生成子代 $P_m^{11}(t)$ ，后者应用细胞克隆操作生成子代 $P_m^{21}(t)$ ；其次，对 2 个子代组成的群体进行疫苗接种和抗体聚类，以改善个体质量并消除相似个体，组成 $P_m^4(t)$ ；最后，根据个体适应值选择较优个体组成新一代的小种群 $P_m(t+1)$ 。整个搜索过程直到找到满意的 Pareto 最优解为止。

4.1 遗传编码

鉴于数据预处理模块生成的在线地图多为栅格地图，因此将栅格坐标映射为染色体的基因，采用二维整数编码形式，设 N 为种群规模， N_m 为第 m 个小种群的规模，则：

$$P_m = \{P_{m1}, P_{m2}, \dots, P_{mk}, \dots, P_{mN_m}\}$$

$$P_{mk} = (p_{k,1}^m, p_{k,2}^m, \dots, p_{k,l}^m, \dots, p_{k,m}^m)$$

$p_{k,l}^m = (x_{kl}, y_{kl})$, $x_{kl} \in [x_{\min}, x_{\max}]$, $y_{kl} \in [y_{\min}, y_{\max}]$ 。其中 $m = 1, \dots, M$, $k = 1, 2, \dots, N_m$, $l = 1, 2, \dots, m$ ，并且有： $N = \sum_{m=1}^M N_m$ 。 x_{kl} 、 y_{kl} 分别对应路径节点的栅格坐标。由于遗传操作仅在小种群内部进行，以下将 $p_{k,l}^m$ 简写为 $p_{k,l}$ 。

4.2 适应性函数

为了执行适者生存的原则，必须对个体位串的适应性进行评价。适应性是群体中个体生存机会选择的唯一确定性指标。对于局部路径规划问题，个体对生存环境的适应能力可以从路径的长度、安全性、平滑度等方面考察，由此定义染色体 P_{mk} 的适应性函数为：

$$J(P_{mk}) = \sum_{i=1}^q \omega_i f_i(P_{mk})$$

其中：

(1) $f_1(P_{mk})$ 表示染色体 P_{mk} 代表的路径的长度适应性：

$$f_1(P_{mk}) = \frac{\sum_{l=0}^m d(p_{k,l}, p_{k,l+1}) - d(p_s, p_e)}{d(p_s, p_e)}$$

其中 p_s 、 p_e 分别表示路径的起点和终点，并且定

义 $p_{k,0} = p_s$, $p_{k,m+1} = p_e$ 。 $d(p_x, p_y)$ 定义为距离函数，表示 2 点之间的空间距离。显然 $f_1(k)$ 的理想值为 0，即规划结果为与起点和终点连线重合的一个路径段。通常情况下，由于理想路径与障碍区域相交，规划出的路径段长度总和将大于理想路径长度，即 $0 \leq f_1(i) < \infty$ 。

(2) $f_2(P_{mk})$ 表示路径安全性尺度，包含 2 个方面：一是 $f_{21}(P_{mk})$ ，表示根据与离线已知障碍和在线已探测到障碍区域的最近距离设定的惩罚系数，设障碍区域标可记为 $\Omega_1, \dots, \Omega_g, \dots, \Omega_G$ ，则：

$$f_{21}(P_{mk}) = \sum_{l=0}^m \max_g b(p_{k,l} p_{k,l+1}, \Omega_g)$$

其中 $b(p_{k,l} p_{k,l+1}, \Omega_g)$ 表示线段 $p_{k,l} p_{k,l+1}$ 与障碍 Ω_g 相对方位的系数。设 d_{\min} 表示 AUV 与障碍的最小安全距离， O_d 表示线段与障碍相交的惩罚系数（通常设定为较大的正整数）， $d(p_{k,l} p_{k,l+1}, \Omega_g)$ 表示线段 $p_{k,l} p_{k,l+1}$ 与障碍 Ω_g 的最近距离。则 $b(p_{k,l} p_{k,l+1}, \Omega_g)$ 计算公式为：

$$b(p_{k,l} p_{k,l+1}, \Omega_g) = \begin{cases} 0 & \text{if } d(p_{k,l} p_{k,l+1}, \Omega_g) \geq d_{\min} \\ O_d & \text{otherwise} \end{cases}$$

安全性尺度的另一方面 $f_{22}(P_{mk})$ 表示染色体 P_{mk} 对应的路径是否与 AUV 航行轨迹 T_{AUV} 相交。这是源于 AUV 对障碍认识的局限性，我们不能判定换一个偏转方向是否能够尽快避开障碍，因此我们期望 AUV 总是朝着一个方向躲避障碍。即：如果路径与 AUV 航行轨迹相交，则对相应的染色体进行惩罚，惩罚值为正数 O_g ；如果两者无交点，则 $f_{22}(P_{mk})$ 等于 0。

$$f_{22}(P_{mk}) = \sum_{l=0}^m g(p_{k,l} p_{k,l+1}, T_{AUV})$$

$$g(p_{k,l} p_{k,l+1}, T_{AUV}) = \begin{cases} 0 & \text{如果 } p_{k,l} p_{k,l+1} \text{ 与 } T_{AUV} \text{ 不相交} \\ O_g & \text{如果 } p_{k,l} p_{k,l+1} \text{ 与 } T_{AUV} \text{ 相交} \end{cases}$$

由此：

$$f_2(P_{mk}) = f_{21}(P_{mk}) + f_{22}(P_{mk})$$

分析上述公式可知，当所有路径段与障碍的最近距离都大于 d_{\min} 时， $f_{21}(P_{mk}) = 0$ 。当所有路径段与 AUV 航行轨迹 T_{AUV} 无交点时， $f_{22}(P_{mk}) = 0$ 。即 $f_2(P_{mk})$ 的取值范围： $f_2(P_{mk}) \geq 0$ 。

(3) $f_3(P_{mk})$ 表示路径平滑度的适应性：

$$f_3(P_{mk}) = \sum_{l=1}^m \frac{\psi_{k,l}}{\pi}$$

ψ_{kl} 表示线段 $p_{k,l-1}p_{k,l}$ 与线段 $p_{k,l}p_{k,l+1}$ 延长线的夹角, $\psi_{kl} \in [0, \pi]$. 显然, 路径段之间的夹角越小, AUV 从一个航向角过渡到另一个航向角所需的时间越少, 代表路径越光滑. 当所有路径段均处于同一直线时, $f_3(P_{mk})=0$.

5 仿真实验 (The simulation tests)

本文将所提方法针对一类以测距声纳为避碰传感器的一类欠驱动型 AUV, 构建了 AUV 实时避碰系统, 并在多功能半物理仿真平台上开展了仿真实验研究. 采用超过 30 种不同的典型单个和多个障碍场景进行仿真实验, 全面演示、验证了 AUV 水平面、垂直面和三维的避碰能力. 本文仅详细介绍其中 2 个仿真实验的结果.

5.1 三维避碰过程

为检验实时避碰方法在紧急转向过程中应对海底危险的能力, 建立仿真环境如图 4(a)所示, 其仿真结果如图 4(b)、(c)、(d)所示.

仿真过程中正前声纳首先检测到障碍危险, 避碰有限自动机进入 S_2 状态. 由于此时无法确定向哪

个方向转向更优, 因此随机选择向右侧偏转. 在避开左侧障碍的同时, 前下和正下声纳检测到 AUV 下方有危险障碍, 这表明单纯调整航向已不能达到规避障碍的目的, 于是转入 S_6 状态, AUV 执行紧急上浮和保持距离行为. 由此, AUV 实现了从水平面避碰向三维避碰的转换.

5.2 加入传感器测量误差后的仿真结果

当 AUV 在实际海洋环境中实施避碰行为时, 测距声纳输出的数据 (即与障碍的相对距离) 总是带有一定的测量误差. 假定该误差为测量值 10% 范围内的随机数, 对图 5(a)所示障碍环境进行仿真. 有无测量误差时 AUV 航行轨迹的对比见图 5(a), 由此可见: 测量误差对 AUV 避碰航迹影响不大. 仿真过程中进行实时路径规划时的在线地图和规划结果如图 5(b), 由图可见: 在 10% 测量误差范围内基于免疫遗传的局部路径规划方法仍能根据在线地图产生绕过障碍的较优路径.

此仿真实验表明, 本文所提出的实时避碰方法能克服一定范围内的传感器测量误差的影响, 引导 AUV 成功避开障碍.

多种典型单个障碍、多个障碍的仿真实验表明:

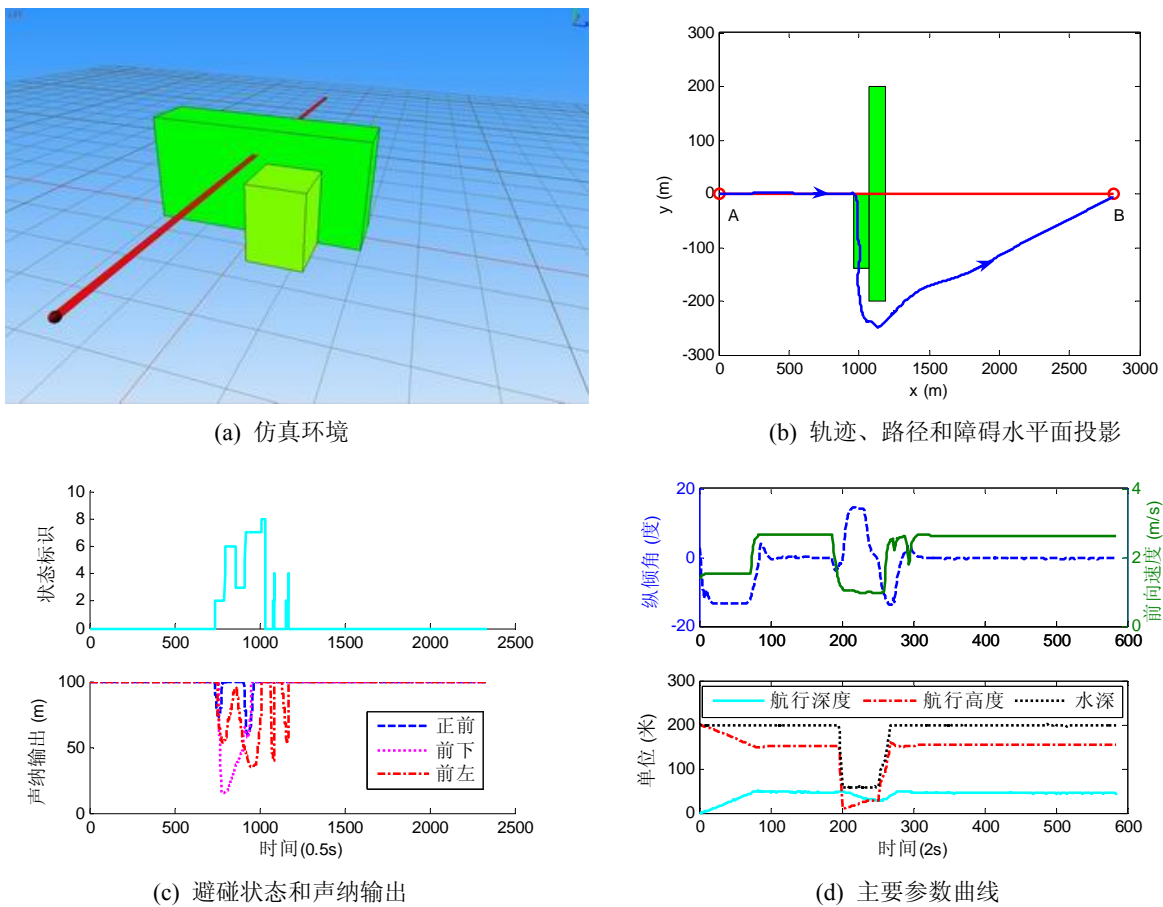
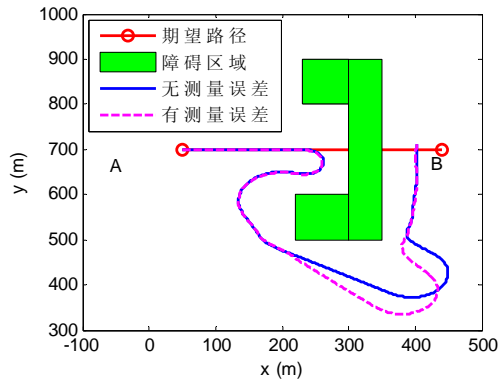
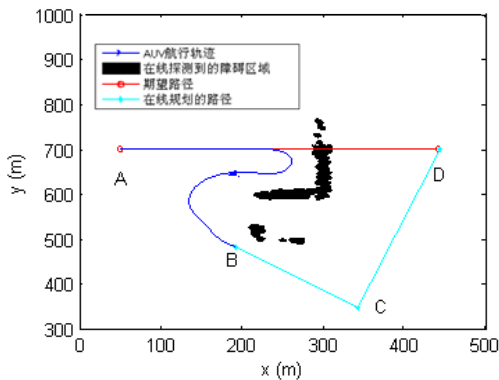


图 4 多障碍场景和仿真结果
Fig.4 The multiple obstacles scenario and its simulation results



(a) 有无测量误差飞行轨迹对比



(b) 在线地图和实时规划的路径

图 5 有无测量误差下的仿真结果对比

Fig.5 Simulation results with or without errors

基于事件反馈监控的模糊避障自动机使该类 AUV 具备了水平面、垂直面和三维的避障能力；能够适应单个凸多边形障碍及其组成的非封闭多障碍场景；避障规划模块与航行控制模块彻底分离，也使得实时避障具有更好的适应性，可广泛用于不具有悬停定位和原地转向能力的欠驱动型 AUV。引入传感器测量误差等不确定因素的仿真实验进一步证明：所提方法具有良好的鲁棒性，具备在实际 AUV、实际海洋环境中应用的潜力。

6 结论 (Conclusion)

针对一类具有远距离航行能力、在未知海区作业的欠驱动 AUV，本文深入研究了基于测距声纳的 AUV 实时避障方法。基于事件反馈监控的避障自动机建立起了水平面避障和垂直面避障的联系，实现了不同避障行为之间的实时切换。基于免疫遗传的路径规划算法结合在线地图中已探测的障碍信息、AUV 当前位置和航行轨迹等信息，能够规划出避开已探测到的障碍的优选路径，从而弥补实时避障行为“短视”的缺陷。多种仿真场景下的半物理仿真实验表明，本文所提方法能够实现 AUV 连续、稳

定的三维避障过程。

参考文献 (References)

- [1] Fodrea L R. Obstacle avoidance control for the remus autonomous underwater vehicle[D]. Meterey, California, USA: Naval Postgraduate School, 2002: 1-79.
- [2] 崔荣鑫, 徐德民, 沈猛. 一种自主水下航行器避障控制策略[C]//Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 9149-9153.
- [3] Cui Rongxin, Xu Demin, Shen Meng. An obstacle avoiding control strategy for autonomous underwater vehicle[C]//6th World Congress on Intelligent Control and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 9149-9153.
- [4] Healey A J. Obstacle avoidance while bottom following for the REMUS autonomous underwater vehicle[C]//Proceedings of the IFAC-IAV 2004 Conference, 2004: 1-6.
- [5] Creuze V, Jouvencel B. Avoidance of underwater cliffs for autonomous underwater vehicles[C]//Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2002: 793-798.
- [6] Chuhuran C D. Obstacle avoidance control for the remus autonomous underwater vehicle[D]. Meterey, California, USA: Naval Postgraduate School, 2003: 1-63.
- [7] Zapata R, Lepinay P. Collision avoidance and bottom following of a torpedo-like AUV [C]//OCEANS. 1996: 571-575.
- [8] Kawano H. Method for applying reinforcement learning to motion planning and control of under-actuated underwater vehicle in unknown non-uniform sea flow[C]//2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 996-1002.
- [9] 洪晔, 边信黔. 基于三维速度势场的 AUV 局部避障研究[J]. 机器人, 2007, 29(1): 88-91.
- [10] Hong Y, Bian X Q. An AUV obstacle avoidance method based on three-dimensional velocity potential field[J]. Robotics, 2007, 29(1): 88-91.
- [11] 徐红丽, 封锡盛, 刘健. 一种自治水下机器人垂直面避障规划方法[J]. 微计算机信息, 2008, 24(23): 262-264.
- [12] Xu H L, Feng X S, Liu J. A vertical plane obstacle avoidance planning method for autonomous underwater vehicle[J]. Microcomputer Information, 2008, 24(23): 262-264.
- [13] 徐红丽, 封锡盛. 基于事件反馈监控的 AUV 模糊避障方法研究[J]. 仪器仪表学报 (增刊IV), 2007, 28(8): 698-702.
- [14] Xu H L, Feng X S. Research on the AUV fuzzy obstacle avoidance method based on event feedback supervision[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(8): 698-702.

作者简介:

徐红丽 (1978—), 女, 博士, 副研究员. 研究领域: 水下机器人智能控制, 多水下机器人协调控制.