

文章编号: 1002-0446(2001)03-0270-05

基于运动平衡点的水下机器人自主避障方式

刘学敏 李英辉 徐玉如

(哈尔滨工程大学船舶与海洋工程系 150001)

摘要: 当前大多数水下机器人的实时避障方式只简单地考虑了目标和障碍物之间的相对距离, 并没有考虑实际的海洋环境以及会不会对控制器产生不利的影响. 本文研究的目的就是从实际出发, 通过设定各个自由度上的运动平衡点, 将水下机器人的自主避障规划和运动控制结合起来, 设计出一个集目标、障碍物和控制性能一体的避障规划方式, 从仿真实验结果来看, 机器人可以安全地通过障碍空间, 到达目的地.

关键词: 自主避障; 信息的统一描述; 运动平衡点

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

OBSTACLE AVOIDANCE OF AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLES BASED ON BALANCE POINT OF MOTION

LIU Xue-min LI Ying-hui XU Yu-ru

(Dept. of Naval Architecture and Ocean Eng., Harbin Engineering University, 150001)

Abstract Update now, most of methods of real-time obstacle avoidance of AUVs are just only considering the relative distance between target and AUV and the distances between obstacles and AUV, but the real sea environment and its bad effects asserted on controller are not given enough notices. The target of this paper is to combine obstacle avoidance planning with motion control according to the real situation and to design a new method incorporating task goal, obstacles and control performance. The results of simulation show that the planning effect is satisfying.

Keywords: obstacle avoidance, united description of information, motion balance point

1 引言(Introduction)

水下机器人的自主避障方式有很多种, 势场法^[1-2]用的是比较多的. 然而势场法中, 无论是避障的规划, 还是运动的控制都是比较粗糙的, 尤其是控制, 仅仅是根据一些相对距离来定控制力的大小, 因此, 研究者很难设计出一种自适应和自学习方式来提高控制器的性能, 这与实际变化的海洋环境(存在潮汐流、风浪、环流等等)是不相符合的. 作者的观点是, 应该将运动控制和避障规划统一起来设计, 而且, 从拟人的角度来看, 应该先根据水下机器人自身的运动能力和海洋的实际环境设计好控制器, 使其具有良好的自适应性和鲁棒性, 然后根据控制器的控制性能来设计实时避障规划器, 就象是我们常说的量体裁衣一样. 这样设计出来的控制器和规划器

就能较为充分地体现实际海洋环境和水下机器人自身能力, 其规划和控制的效果当然就好于通常随意性比较大的方式.

通常设计的控制器其输入为位置偏差和位置偏差的变化率, 那么, 从运动目标和传感器信息到控制指令之间, 就应该有两步计算: 一是从任务目标和传感器数据到偏差和偏差变化率(实时规划器的设计, 这里需要声明的是, 任务目标指的是某一个作业点, 在水下机器人向作业点运动的过程中, 考虑到障碍物的影响需要实时地规划当前时刻的运动目标, 而这一实时的运动目标就体现在控制器输入的偏差和偏差变化率上); 二是从偏差和偏差变化率到控制指令(控制器的设计). 然而, 这两步并不是分割的, 而是联系紧密的. 我们知道, 一个好的控制器通常是

在较为深入地研究了控制对象的动力学性能后的优化设计结果, 因此, 本文就在已设计好的控制器各参数基础上统一描述控制系统的输入信息, 即避障规划信息, 从而在既考虑执行上层目标指令又考虑避开障碍物等行为之间做出快速反应, 以确保水下机器人在执行任务期间的航行安全。

2 规划器的设计 (Design of planner)

由于这里提到的实时避障规划器与以往传统的规划器的含义有所不同, 所以我们更倾向于称之为信息的统一描述^[3], 即将任务目标信息、障碍物信息和控制器性能信息统一描述, 以获得实时的避障规划信息。为什么要对信息进行统一的描述, 主要有两点理由: 一是对任务目标和障碍物信息等作一个空间上的融合, 二是在目标制导和避碰等行为之间进行协调, 使得控制器的偏差和偏差变化率的输入在时间上是平滑连续的, 这改变了以往那种各行为之间切换时控制器输入的跳跃式变化, 当然, 也有一些文献^[2]通过定义一些额外的函数公式来平滑控制力的输出, 但是, 由于输入本身的跳跃式变化就对控制效果产生一定的影响, 同时额外的调整也增加了控制系统的复杂程度, 因此不是一个很好的方式。本文提出一个对于多种不同类信息(运动目标, 障碍物信息等等)的简单实用的统一描述, 既解决了以上所提到的一些问题, 同时由于使用了控制器参数, 这一描述也充分反映了控制器的性能。

根据水下机器人的声纳布置, 通过建立运动的平衡点来实现信息的统一描述。

(1) 建立水下机器人的运动平衡点。

根据水下机器人的体形和控制性能以及对特定

环境下安全距离大小的考虑构造一个一定大小的虚拟外壳, 外壳上的所有点就是本文所要建立的水下机器人的运动平衡点。这里运动平衡点的含义就是当水下机器人对外界信息作处理之后得到的感知在运动平衡点之外时, 机器人的运动是按规划的意志前进, 在平衡点之内时(除最终目标点之外), 表明外界已经对机器人产生了潜在的危险, 需要暂时放弃规划的运动, 而执行规避危险的运动控制。在平衡点上, 表明规划的意志和环境的危险体现在水下机器人的感知上是相互抵消, 此时机器人的运动为零。建立水下机器人的运动平衡点的目的是想建立一个水下机器人运动控制信息的统一描述, 这些信息包括了规划信息、障碍物信息, 甚至海流信息等等, 从而有利于系统构造的清晰化和模块化, 同时也具有较强的扩展性能。

事实上, 我们并没有必要将该虚拟外壳上的无穷个点都用于实际的运动控制中, 考虑到水下机器人处于三维环境中, 因此, 我们就可以选取艇体坐标轴纵向、横向和垂向三个方向上的点作为运动平衡点, 而其他的点通过他们之间的比例关系变换到这三个方向上, 从而在实际的运动控制过程中, 信息的统一描述的结果也就是这三个方向上的融合信息, 当然, 考虑到水下机器人在三维空间里作六自由度的运动, 因此, 还应该加上三个方向上的转动信息, 组成一个完整的信息描述。

由于二维描述跟三维描述没有本质上的区别, 为了叙述简单和方便, 以下就在二维的范畴里对运动平衡点和信息的统一描述作详细的说明。

图 1 给出了运动平衡点的形象描述,

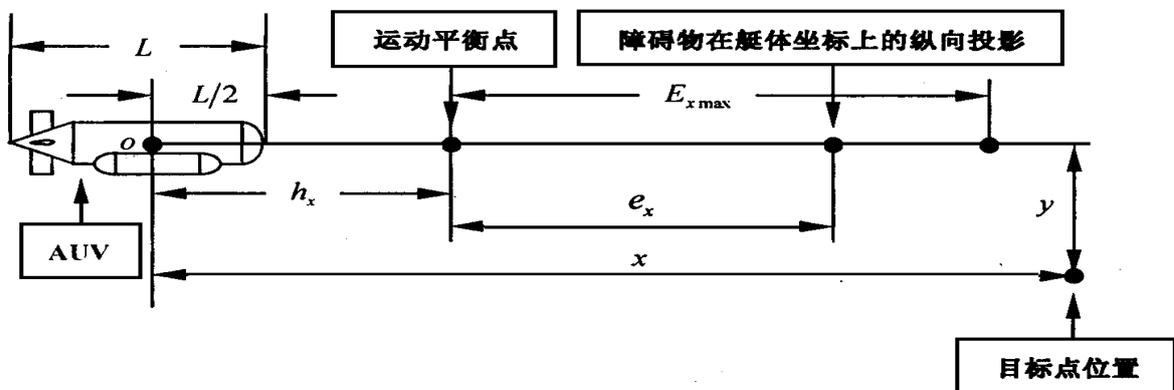


图 1 运动平衡点和信息统一描述

Fig. 1 Motion balance point and united description of information

h_x 代表了纵向平衡点与水下机器人艇体坐标原点之间的纵向距离,其大小与下面公式(1)中给出的 OA 是等同的,同理,还有横向、垂向运动平衡点.图中 o, x, y 分别是艇体坐标原点和目标点在艇体坐标上的坐标值,而 e_x 为统一描述的纵向信息,将在随后作详细阐述.

(2) 目标点和障碍物等信息的统一描述

首先给出一些符号的含义, $E_{x_{max}}, E_{y_{max}}$ 和 $E_{\psi_{max}}$ 分别是纵向、横向和艏向的控制参数,即控制的最大偏差,我们知道,控制的最大偏差既体现了控制器的能力,同时也反映了控制器的性能,这里我们引入这些参数,也就是在规划器中考虑控制能力这一初衷的体现.

对于必达的运动目标点来说,分两个阶段:远距离制导和近距离逼近与定位,两者的信息描述有所

不同.

远距离制导:

在远距离制导过程中,对于水下机器人来说,任务目标点和障碍物所产生的影响是一样的.即不管是任务目标点还是障碍物,当其处于运动平衡点时,对水下机器人产生吸引力;处于运动平衡点内时,对水下机器人产生排斥力;而处于运动平衡点时,对水下机器人的作用为零.在实际控制中,对艏向规划做一个提前量,可以防止水下机器人在没有到达任务目标点之前停滞不前.因此,这里不妨把任务目标点和声纳探测到的障碍物位置点统称为信息点.如图2所示是某个声纳探测到某个障碍物时,障碍物信息是如何转换到艇体坐标上,以及如何运用运动平衡点来统一描述该信息.

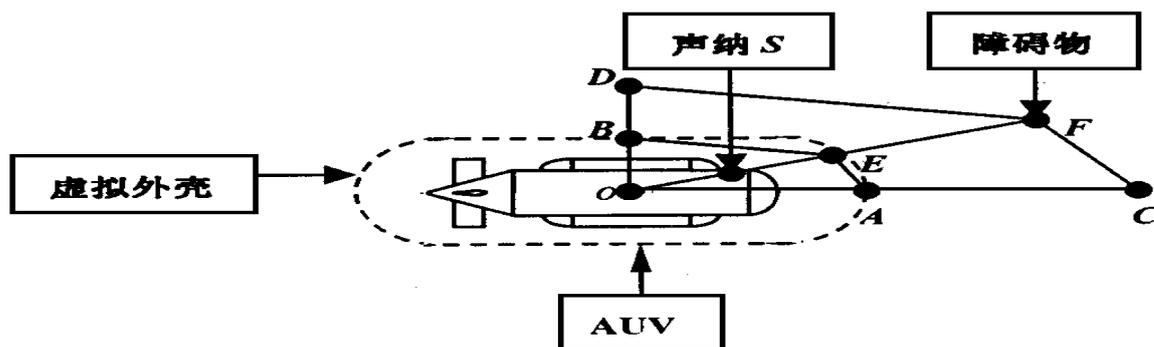


图 2 信息的统一描述方法

Fig. 2 Method of united description of information

这里,虚线框表示以上所说的虚拟外壳, O 点为水下机器人的中心位置,某个声纳 S 在机器人艇体上的布置如图所示,与重心的距离为 OS , $\angle AOE$ 为声纳探测方向与机器人运动坐标系纵向轴之间的夹角, E 点为该声纳的探测线与虚拟外壳的交点,而 A, B 两点分别是机器人纵向轴和横向轴与虚拟外壳的交点,也就是所说的水下机器人纵向和横向的运动平衡点, F 点为障碍物所处的位置, SF 为声纳返回的障碍物的距离信息.因此,首先我们把障碍物的距离信息转换成纵向和横向上的两个分量,即将 F 点出的障碍物对机器人的影响分解成 C 点和 D 点两处有障碍物时对机器人的影响,这里 AE 和 CF , BE 和 DF 两两平行.

即有: $OF/OE = OC/OA = OD/OB$

可得: $OC = OA * (OS + SF)/OE, OD = OB *$

$$(OS + SF)/OE$$

声纳信息在平衡点上的描述如下:

$$e_x = \begin{cases} E_{x_{max}}, OC - OA \geq E_{x_{max}} \\ OC - OA, -E_{x_{max}} \leq OC - OA \leq E_{x_{max}} \\ -E_{x_{max}}, OC - OA \leq -E_{x_{max}} \end{cases} \quad (1)$$

$$e_y = \begin{cases} E_{y_{max}}, OD - OB \geq E_{y_{max}} \\ OD - OB, -E_{y_{max}} \leq OD - OB \leq E_{y_{max}} \\ -E_{y_{max}}, OD - OB \leq -E_{y_{max}} \end{cases} \quad (2)$$

$$e_\psi = \begin{cases} E_{\psi_{max}}, (e_x - d)/E_{x_{max}} \geq 1 \\ E_{\psi_{max}}(e_x - d)/E_{x_{max}}, -1 \leq e_x/E_{x_{max}} \leq 1 \\ -E_{\psi_{max}}, (e_x - d)/E_{x_{max}} \leq -1 \end{cases} \quad (3)$$

其中 d 是上面所说的提前量,保证水下机器人

不会陷入陷阱中, 其值的大小需要在实验中进行调整.

同理, 对于其它声纳探测到的障碍物以及任务目标点作同样处理, 最后对所得到的结果取极小值, 其结果就是我们所要得到的任务目标点和障碍物等信息基于运动平衡点的统一描述, 即规划的目标, 也是控制器的偏差输入, 而控制器的偏差变化率输入是水下机器人各个自由度的运动速度.

近距离逼近和定位:

(x, y, ψ) 为任务目标点在艇体坐标上坐标值, 这里设定当 x, y 一旦都小于或等于 $E_{x \max}, E_{y \max}$ 时, 水下机器人的运动控制就从远距离制导切换到近距离逼近与定位. 应该来说, 近距离逼近与定位时, 在水下机器人的安全距离范围内不存在任何的障碍物, 这样的任务目标点才是可以到达的, 否则就是错误的目标点, 因此, 此时只需要考虑任务目标点的作用就行了, 与一般的目标制导策略没有什么差别.

$$e_x = \begin{cases} e_{x \max}, & x \geq E_{x \max} \\ x, & -E_{x \max} \leq x \leq E_{x \max} \\ -E_{x \max}, & x \leq -E_{x \max} \end{cases} \quad (4)$$

$$e_y = \begin{cases} e_{y \max}, & y \geq E_{y \max} \\ y, & -E_{y \max} \leq y \leq E_{y \max} \\ -E_{y \max}, & y \leq -E_{y \max} \end{cases} \quad (5)$$

$$e_\psi = \begin{cases} e_{\psi \max}, & \psi \geq E_{\psi \max} \\ \psi, & -E_{\psi \max} \leq \psi \leq E_{\psi \max} \\ -E_{\psi \max}, & \psi \leq -E_{\psi \max} \end{cases} \quad (6)$$

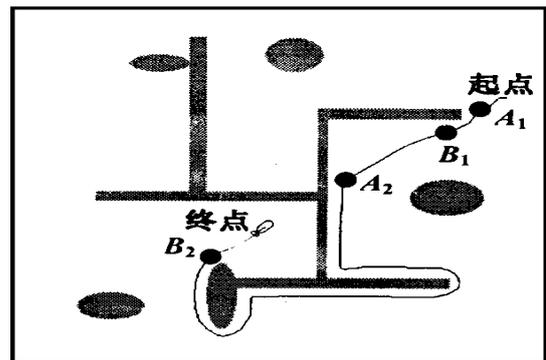
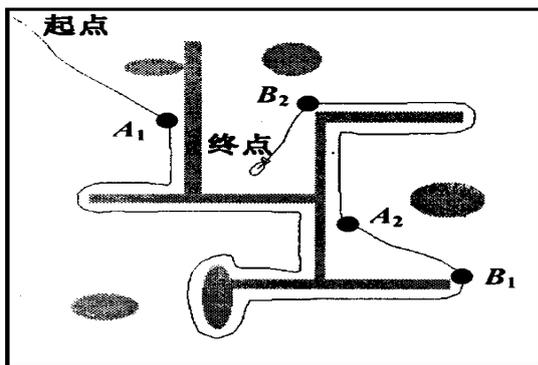
3 避障策略 (Avoidance strategies)

借鉴[4], 本文水下机器人的避障策略包括目标制导、发现障碍物, 绕过障碍物和脱离障碍物四个顺次连接的阶段. 本文提出的避障策略, 是按时间顺序进行决策的. 一般来说, 当机器人开始运动时, 传感器没有探测到障碍物的存在, 而上层规划给出下一时刻机器人的运动目标信息, 机器人作目标制导运动. 在运行过程中, 传感器实时探测周围环境的信息, 一旦发现障碍物, 机器人作绕过障碍物的运动, 在运动过程中, 不断判定是否处于脱离障碍物的区域, 如果不在, 继续绕障碍物的运动方式, 如果在, 即进入脱离障碍物运动的方式, 一旦脱离了障碍物, 又回到目标制导的运动控制上来. 也就是说, 没有发现障碍物的过程, 就没有绕过障碍物的过程, 也就更无从谈起脱离障碍物, 这是顺序进行的, 是一个循环. 由于采用信息的统一描述方式, 控制信息在目标制导、发现障碍物, 绕过障碍物之间的转换过程中是连续的, 从而使得控制器的控制输出是连续的, 保证了机器人运动的平滑.

4 仿真实验 (Simulations)

这里给出两组仿真实验, 如图 3.

在仿真实验中, 水下机器人事先并没有障碍物的信息, 根据实时的传感器信息做避障运动.



(a)

(b)

图 3 避障仿真实验

Fig. 3 The simulations of avoidance

从图中可以看出, 机器人在 A_1 和 A_2 处进入绕障碍物运动阶段, 在 B_1 和 B_2 点处脱离障碍物, 在整

个绕障碍物运动过程中, 由于由障碍物信息得到的值小于任务目标产生的偏差值, 因此, 在这一阶段

中, 机器人完全是受障碍物信息的控制, 在机器人的横方向上与障碍物保持一定的安全距离, 艏向随着障碍物的走向而随时改变, 同时由于艏向相对于纵向控制有一个提前量, 也就是说, 在运动过程中, 总是能保证机器人的前向速度不为零, 从而实现机器人的绕壁运动. 而机器人的绕避运动, 就保证了机器人在作避障运动过程中最终不会偏离任务目标点的方向. 这一点从实验图中可以看出, 同时也说明该方法下的避障运动不会出现陷阱问题.

5 结论(Conclusion)

应用本文提出的信息统一描述思想, 可以较好地解决目标制导和避开障碍物之间的矛盾以及各运动阶段之间的衔接问题, 同时由于在规划中考虑到了控制器的性能, 使得规划的结果既体现了运动空间的几何特性, 又体现了机器人的物理特性. 当然, 有时候物理环境的复杂程度远远大于仿真实验中所描述的那样, 因此, 对于自主式水下机器人来说, 不但应该具备实时避障的能力, 还应该具有感知环境, 建立世界模型的能力, 这样一来, 水下机器人就能够根据自己建立的世界模型优化作业时的规划路线, 从而做到全局优化, 避免航行的盲目性, 提高执行使

命和完成任务的效率和成功率. 如何将全局规划和实时避障这两者优化组合起来, 将是今后的研究目标.

参考文献 (References)

- 1 耿兆丰, 吴永敢. 基于势场的运动避障规划. 机器人, 1992, 14(5): 38- 43
- 2 Khatib O. Real Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots. International Journal of Robotics Research, 1986, 5(1): 90- 98
- 3 Xuemin Liu, Shuang Zhang, Yinghui Li, You Shang. A New Method for AUV's Collision Avoidance. Proceedings of the 11th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology, August 1999, 23- 25: 587- 591
- 4 Li Wei. Behavior Based Control of A Mobile Robot in Unknown Environments Using Fuzzy Logic. Control Theory and Applications, 1996, 13(2): 153- 161

作者简介:

刘学敏 (1975-), 男, 博士生. 研究领域: 水下机器人控制与智能水下机器人.

李英辉 (1973-), 男, 博士生. 研究领域: 水下机器人操纵与控制技术.

徐玉如 (1945-), 男, 博士生导师. 研究领域: 智能水下机器人集成与控制技术.

(上接第 237 页)

自主式微型移动机器人所面临的环境也常常是动态的、未知的, 很难预先对机器人的移动路径进行规划, 为此本文采用基于行为的方法, 结合机器人的漫步行和机器人的自动避障行为, 实现了自行设计的微型移动机器人在未知环境中的单个和多个移动机器人的安全漫步. 在进行自动避障行为设计时, 由于自行设计的微型移动机器人的障碍物传感器分布于机器人四周, 且数目较多, 很难采用规则的方式较好地设计该基本行为, 为此采用电机神经网络和增强式的自动避障动作评价, 根据动作评价的结果, 在线修改网络的权值, 较好地实现了机器人的自动避障行为.

参考文献 (References)

- 1 Brooks R A. A Robust Layered Control System for A Mobile Robot. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1986, RA- 2 (1)
- 2 Maja J. Mataric. Designing and Understanding Adaptive Group

Behavior, Adaptive Behavior, 1995, 4: 1: 51- 80

- 3 Paolo Pirjanian. Behavior Coordination Mechanisms -State-of-the-art, Tech-report IRIS-99-375, Institute for Robotics and Intelligent Systems. School of Engineering, University of Southern California, October 1999
- 4 Ulrich Nehmzow. Acquisition of Smooth Continuous Obstacle Avoidance in Mobile Robot. Proc. Workshop Prerational Intelligence in Bielefeld, 1994, 25(1): 28- 34
- 5 Shigem i Nagata. Minoru Sekiguchi, Kazuo Askawa. Mobile Robot Control by a Structured Hierarchical Neural Network. IEEE Control System, April 1990. 69- 76

作者简介:

李小海 (1973-), 男, 博士生. 研究领域: 多智能体分散控制, 微型移动机器人等.

程君实 (1939-), 男, 教授, 博士生导师. 研究领域: 机器人控制, 复杂系统的智能控制等.

陈佳品 (1960-), 男, 副教授. 研究领域: 机器人控制, 微型移动机器人等.