

基于遗传算法的 AUV 三维海底路径规划

郝燕玲, 张京娟

(哈尔滨工程大学自动化学院, 哈尔滨 150001)

[摘要] 研究 AUV 在三维海底地形环境中的路径规划问题。针对三维地形中路径的不同特点, 将路径分为 3 种类型。设计了优化路径的遗传算法实现方案, 所提出的惩罚函数及启发性知识的使用, 使算法能灵活的得到具有不同特点的最优路径。仿真实验表明了该算法的可行性与可靠性, 对 AUV 的安全航行具有重要的理论意义及应用参考价值。

[关键词] 三维路径规划; 遗传算法; 海底地形; 水下潜器

[中图分类号] TP242 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2003)11-0056-05

1 引言

运动规划是自主式水下机器人 (AUV, autonomous underwater vehicle) 智能控制的关键技术之一, 在一定程度上直接关系到 AUV 智能水平的高低。运动规划包括路径规划与轨迹规划, 路径规划是在一定的障碍物环境中给定初始位置 S 和目标位置 G , 按照一定的策略使 AUV 从 S 无碰撞地到达 G , 并满足一定的优化准则 (如路径长度最短、能量消耗最小等); 轨迹规划则是沿着计划的路径, 根据机器人的动力学特性规划机器人运动过程中的位置、速度及加速度等。研究 AUV 在三维海底地形环境中的路径规划问题。

目前, 国内外有许多研究机器人路径规划的算法^[1-5]。然而, 这些方法大多是用二维空间的, 其中, 部分算法称可以推广至三维空间。但实际上, 由于三维空间特有的时空复杂性, 对二维路径规划算法简单地加以推广是不可行的。针对三维空间中的路径规划问题, 已经采用的方法包括 C. W. Warren 及孙茂相等使用的人工势场法^[1, 2]、K. P. Carroll 提出的 A^* 搜索^[3]、Vasudevan 和尚游等基于案例的推理算法^[4, 5]等, 都有其特点。但

是, 势场法中不可避免地会陷入局部最小, 而且当采用复杂的优化准则时, 势场法不能直接加以推广。 A^* 搜索算法能够用于高维问题, 但随着维数的增加, A^* 算法的时空要求将很难得到满足。基于案例推理的途径根据局部的障碍物调整路径, 有时不能获得全局最优的路径。

遗传算法由于具有优良的全局寻优能力和隐含并行性, 在求解复杂的优化问题方面有许多成功的应用。实践证明, 遗传算法能够解决传统的优化算法在一定的时间内不能求解的复杂问题。因而, 对于具有复杂时空要求的三维路径规划问题, 针对海底地形环境, 设计了一种基于遗传算法的实现方案, 大量的仿真实验证明了算法的可行性和可靠性。

2 三维海底地形路径规划问题的描述

假设在三维海底世界中, AUV 要从初始位置 S 到达目标位置 G 。这里, 海底地形的表示采用的是深度表示法, 即在每一确定的位置, 用深度值表示该点的地形。为了描述问题的方便, 采用图 1 所表示的规划环境, 使 S 和 G 位于 2 条对角分布的垂直边上。由于 Z 轴采用向上的方向, 相应的海

深数据变成高度值，以下统一称为高度。对路径的表示采用栅格法，也就是说，将图中的 $X - Y$ 平面根据适当的粒度划分为 $n \times n$ 的栅格，每一栅格有一个路径高度值。这样，一条连接 S 和 G 的路径就表示为一系列 S 和 G 之间的相邻栅格。这里的栅格划分只针对路径的表示，实际的地形环境不做任何处理，只要能求得每一栅格里的最大地形高度即可。这种表示方法的优点是对于海底地形的表示没有任何限制。

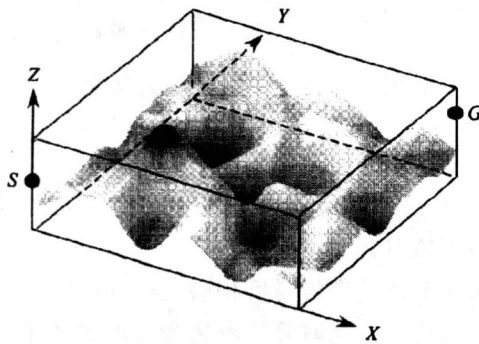


图 1 规划空间的表示

Fig.1 Representation of planning environment

至于栅格的标识，采用序号标识法与直角坐标法相结合的方法^[6]。路径的每一个栅格点采用序号标识法，以节省内存且给遗传操作带来方便。在对路径进行评价时，将序号转换成直角坐标形式，以便于计算路径距离以及检验栅格的高度值。

3 算法设计

3.1 编码方案与种群初始化

用遗传算法解决路径规划问题，1 个染色体代表 1 条路径。在采用栅格法建立的工作环境中，1 条路径就是一系列栅格的有序排列。由于路径长度不确定，所以采用变长编码的方式。其中，第一个栅格为起点 S 所在的栅格，后面紧接着是不等数量的中间栅格，最后 1 个栅格为终点 G 所在的栅格。由于栅格的标识采用的是序号标识法，所以每一个路径点由栅格序号和该栅格点处的路径高度值表示，如图 2 所示。初始种群中各路径的长度任意产生，路径中的栅格序号任意产生，该栅格的高度值也任意产生。

3.2 适应值评价函数

染色体的评价函数表示路径的代价，对二维路径，评价函数一般为路径的长度。在三维路径规划时，由于具有高度的信息，在路径评价时，就需要

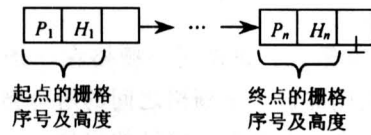


图 2 表示路径的染色体示意图

Fig.2 Chromosome representing a path

考虑高度值对路径评价的影响。笔者采用 2 种评价函数，评价函数 1 采用三维路径长度为评价函数：

$$F(i) = \sum_{j=1}^{N_i-1} L_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, M, \quad (1)$$

式中， L_{ij} 为第 i 条路径的第 j 段的欧几里德距离。 M 为种群中的路径总数。 N_i 为第 i 条路径的栅格总数。

评价函数 2 考虑 AUV 本身的特性，根据待求路径的不同特点，例如为节省能量消耗，尽量使 AUV 在同一高度平面内运动，或者进行海底探测时，使 AUV 跟踪海底地形等等。根据相邻栅格的高度差对相应的路径段施加一定的惩罚，评价函数 2 为

$$F(i) = \sum_{j=1}^{N_i-1} (1 + w_{ij}) L_{ij}, \quad (2)$$

式中， w_{ij} 为第 i 条路径的第 j 段路径的惩罚系数。通过调整惩罚系数 w_{ij} ，就可以得到具有不同特点的路径。

3.3 遗传算子设计

采用的算子能有效地产生任意形状的路径，每个算子以一定的概率改变中间栅格的位置和该位置的路径高度。对遗传算法中的常用算子，如赌盘选择加精英保存策略的选择算子、单点交叉算子、基本位变异算子等（略）^[7]，这里重点介绍适合于路径规划的特殊算子。

1) 重合点杂交算子 在 2 条相互配对的路径中查找其栅格重合点，以重合点为界，以一定的概率相互交换其后的部分基因，从而形成 2 条新的路径。

2) 插入算子 由于初始路径是任意产生的，其相邻序号大多数是不连续的。另外，执行杂交和变异操作也可能造成相邻栅格的不连续。因此需要采用插入算子对不连续的栅格进行插值，使路径连续。由于三维环境中所有的栅格都可行，只是路径的代价不同。所以，采用 2 种不同的插入算子。插入算子 1 直接插入两不相邻栅格的中间栅格。插入算子 2 在两不相邻栅格之间搜索合适高度的可行

栅格。

3) 删除算子 如果同一栅格在一条路径中出现重复, 则删除这 2 个栅格之间的所有栅格及重合栅格中的 1 个, 避免多余路径的出现。

4) 倒位算子 颠倒随机指定的两相邻栅格在路径中的排列顺序, 使遗传算法有利于生成较好模式的路径。

3.4 遗传算法参数的确定

遗传算法的运行参数往往是根据经验或者通过一定的试验获得, 一般需要提前设定。在仿真中, 除插入算子和删除算子是当路径出现间断或冗余时根据需要调用外, 其他运行参数的取值见表 1。

表 1 三维地形中路径规划算法运行参数取值表

Table 1 Parameters used for path planning algorithm in 3D environment

路径规模 N	进化代数 G	杂交率 p_c	变异率 p_m	倒位率 p_d
30	100	0.8	0.1	0.1

4 算法的仿真分析及改进设计

以仿真的海底地形为例, 将规划空间分为 50×50 的栅格, 用上述设计的遗传算法进行路径规划。为了能够准确直观的看出各条三维路径的特点, 仿真得到的各三维视图观察视角略有不同。

实验 1 给定起点 S , 终点 G , 及 S 和 G 点的高度值, 高度值可相同也可不同。

采用式 (1) 作为评价函数。初始化时, 中间栅格的位置及其高度在限定的值域范围内任意产生, 遗传操作所改变的栅格及其高度也任意产生。由于在同一栅格处, 高度值不同所表示的路径就不同, 这样就存在栅格位置及其高度的双重优化任务, 使遗传算法难以收敛到在三维意义上最优的路径, 最后会产生如图 3 所示的优化路径。该路径从栅格位置点的分布来看, 接近于起终点的直接连线。因为只要达到一定的高度, 在三维地形中的任意栅格都是可行的, 所以如果不考虑高度的优化, 只有位置优化任务时, 所设计的遗传算法能得到最优的路径解。图 3 所求得的路径就栅格的位置而言获得了最优。但是, 这样的路径在高度上具有振荡, 相应于 AUV 的频繁上浮和下潜, 对于 AUV 的运动是非常不利的。这也是三维路径规划与二维路径规划的主要不同, 需要对算法进行改进。改进的思路是: a. 使用启发式知识来确定栅格的高度值; b. 对超过一定限制高度的路径施加

惩罚。

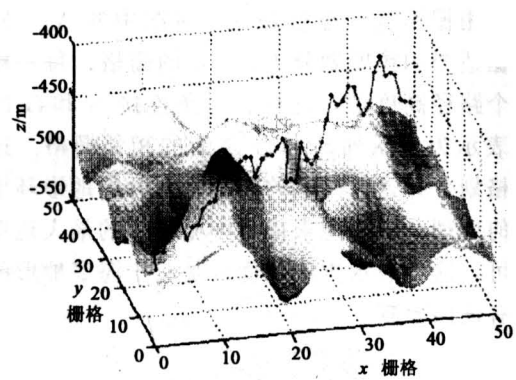


图 3 实验 1 路径规划结果

Fig. 3 Planning result of experiment 1

实验 2 给定起点 S , 终点 G , 同时给定这 2 点的高度值, 且高度值相同。

由于起终点栅格高度相同, 可以在这一高度平面内进行规划, 此时算法退化为二维的情况, 但这只是三维路径中的一种情况。针对三维路径所固有的特点, 可以产生 3 种类型的优化路径。其一是最简单的路径, 即直接连接起终点的路径, 各栅格的高度值随地形高度的变化而变化; 其二是以二维规划来处理, 让路径的高度值不发生变化, 只优化路径的位置点, 产生绕山腰到达终点的平面路径; 其三, 因为第一类路径中有许多大幅度的上浮和下潜操作, 对 AUV 运动不利。而第二类的路径在某些地形情况下, 会为了找到同一平面的路径点而绕得很远而得不偿失。于是第三类路径便折衷考虑上述 2 种因素, 产生既有较少高度变化, 又有较短绕道的最优路径。

算法的具体改进方法是:

1) 使用 2 种插入算子。插入算子 1 适用于寻求第一种类型的路径, 直接插入两不相邻栅格的中间栅格。插入算子 2 适用于寻求第二和第三种类型的情况, 当直接插入的中间栅格高度值超出一定限制时, 在其一定邻域内搜索合适的栅格。

2) 对栅格的高度值采用启发式知识。当某一栅格位置的地形高度低于起终点的高度值, 该栅格的高度值等于起终点高度。否则, 在该栅格周围的一定邻域内搜索合适栅格。

3) 增加惩罚项, 采用式 (2) 作为评价函数。当相邻栅格高度差超过一定值时, 对该段路径实施一定的惩罚, 从而降低整个路径的适应度, 使该路径被遗传到下一代群体中的机会减少。与插入算子

2 配合使用，产生第二和第三种类型的路径。惩罚系数（权值）决定了所求路径的类型：惩罚系数小，容易产生第三类路径，惩罚系数越大，越容易产生第二类路径。

仿真结果如图 4 所示。其中，Path 1 直接连接起终点，此时惩罚系数 $w_{ij} = 0$ 。Path 2 只进行位置点的优化，取 $w_{ij} = 6$ 。产生绕山腰到达目的地，高度值不变的二维路径，如图 4b。Path 3 综合考虑高度及位置的影响，取 $w_{ij} = 2$ ，产生既不绕得很远又不爬得很高的折衷路径。仿真结果证明对算法所做的改进很有效。

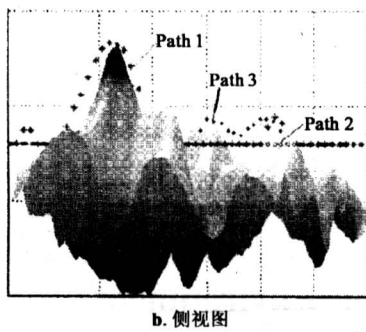
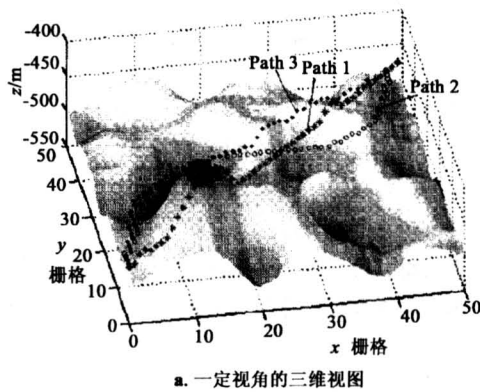


图 4 起终点高度相同时的规划结果
Fig.4 Planning results of the start and the end point with same depth

实验 3 给定起点 S，终点 G，同时给定这两点的高度值，但高度值不同。

由于此时起终点的高度值不同，那么每一个路径栅格的高度值就需要变化。由图 3 已知对任意产生的高度值进行优化显然是不可行的，这里对栅格高度值的启发式知识与实验 2 有所不同，即无论栅格的位置和数量如何变化，让整条路径的高度值在起终点的高度间均匀的减增或者渐减。这样，由于

高度值的变化有确定的方向和目的，所以，同实验 2 一样，采用合适的惩罚系数，就能够根据需要产生不同特点的优化路径。

在不同地形中的仿真结果如图 5 和图 6 所示。图 5 给出了仿真所得的 2 条路径。其中，Path 1 取 $w_{ij} = 0$ ，产生的路径直接连接起终点。Path 2 取 $w_{ij} = 5$ ，产生的路径绕山腰而行高度渐增，由图 5b 可以明显看出。

再看与图 3 和图 4 相同地形的规划结果。由于此地形起伏多变，不能产生如图 5 中的路径 Path 2 那样高度均匀缓增，绕山腰而行的路径。图中 2 个圆圈所示的部分，即为 2 个仅凭高度缓增绕不过去的山包。虽然此时缓增的路径绕不过山腰，但是通过适当的调整惩罚系数，算法仍然能够产生出不同程度的优化路径，如图 6 中的 Path 1 和 Path 2 所示。其中 Path 2 的惩罚系数大 $w_{ij} = 8$ ，产生的路径起伏较平缓，但绕得稍远。而 Path 1 的惩罚系数稍小 $w_{ij} = 3$ ，产生的路径就陡峭一些，但绕得近一些。由此可见，要想产生适合特点的路径，需要选择合理的惩罚系数。

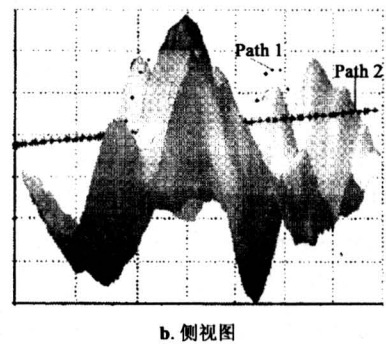
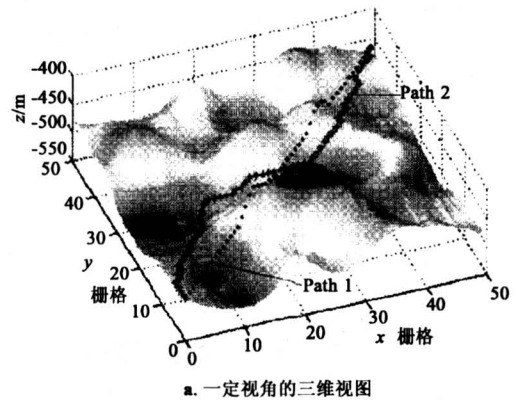


图 5 起终点高度不同时的规划结果（地形一）
Fig.5 Planning results of the start and the end point with different depth (example 1)

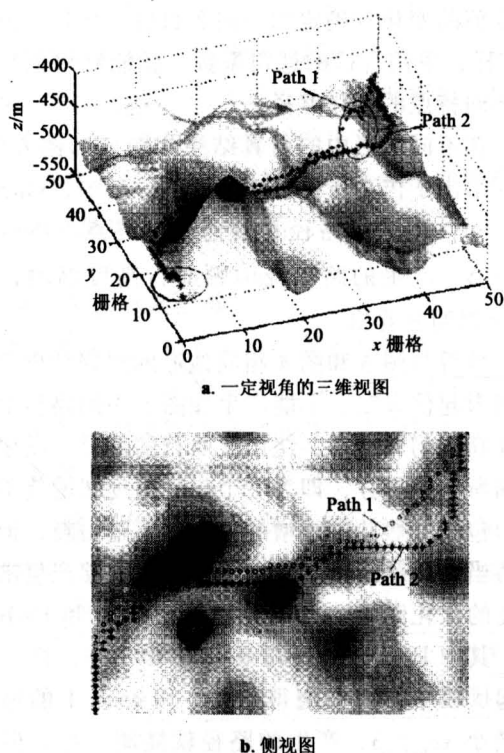


图6 起终点高度不同时的规划结果(地形二)
Fig.6 Planning results of the start and the end point with different depth (example 2)

5 结论

针对三维地形环境,设计了一种基于

遗传算法的路径规划方法。考虑三维路径的多样性,通过加入启发式知识及惩罚函数,算法能灵活地获得不同特点的优化路径。仿真实验表明了算法的可行性与可靠性,这对于AUV的安全航行具有重要的应用参考价值。

参考文献

- [1] Warren C W. A technique for autonomous underwater vehicle route planning [J]. IEEE J of Oceanic Engineering, 1990, (15): 199~204
- [2] 孙茂相,王艳红,吴学曼,等. 动态补偿的水下机器人路径规划[J]. 机器人, 1993 (2):8~12
- [3] Carroll K P, McClaran S R, Nelson E L, et al. AUV path planning: an A* approach [A]. Proc Symp on AUV Technology [C]. Washington D C, 1992. 79~84
- [4] Vasudevan C, Ganesan K. Case-based path planning for autonomous underwater vehicles [J]. Autonomous Robots, 1996, (3): 79~89
- [5] 尚游,刘百顺,张万春,等. 基于案例的自主式水下机器人全局路径规划的学习算法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 1998, 19 (5): 1~7
- [6] 孙树栋,曲彦宾. 遗传算法在机器人路径规划中的应用研究[J]. 西北工业大学学报, 1998, 16 (1): 79~83
- [7] 潘正军,康立山,陈毓屏. 演化计算[M]. 北京:清华大学出版社, 1998

AUV Path Planning in 3D Seabed Environment Using Genetic Algorithm

Hao Yanling, Zhang Jingjuan

(College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

[Abstract] The path-planning algorithm of AUV in 3D seabed environment is studied. For 3D environment, the optimal paths are classified into three different types. The optimal paths of each type are obtained flexibly by using genetic algorithm, especially the incorporating of problem-specific knowledge and penalty function. Simulation results show the feasibility and reliability of the path-planning algorithm, which has considerable value on the safe navigation of AUV in seabed environment.

[Key words] 3D path planning; genetic algorithm; seabed terrain; underwater vehicle