

不确定环境下集矿机环境感知与实时避障研究*

杨放琼, 谭青, 彭高明
(中南大学机电工程学院, 湖南长沙410083)

摘要:通过对海底集矿机作业特点及作业环境分析可知,采用传统势场法避障要解决的关键问题主要为局部极小问题,由此提出了基于人工势场法的改进算法。重新定义势函数,对斥力函数作了改进,建立了履带式集矿机的运动学模型,并成功应用于海底不确定环境下集矿机的实时避障。仿真结果表明:改进后的避障算法能够使机器人逃离局部极小,顺利避障并到达目标,具有较强的实用性与可行性。该研究对于海底采矿及水下机器人的避障具有一定的指导意义。

关键词:集矿机;人工势场法;避障

中图分类号:TD857 **文献标志码:**A **文章编号:**0529-6579(2010)04-0058-05

Research on Environment Sensing and Real-time Obstacle Avoidance for Miner under Unknown Environments

YANG Fangqiong, TAN Qing, PENG Gaoming

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: By analysis on operation characteristics and environments of sea-bed miner, the key problem is the local minimum when traditional potential field method is applied on obstacle avoidance. An improved algorithm based on artificial potential field method was put forward. The potential field was redefined and the repulsive potential function was improved. The kinematics model of crawler miner was constructed. It was applied on real-time obstacle avoidance of miner in sea-bed unknown environment successfully. The simulation results show that the robot can skip from the local minimum and get to the goal smoothly. The improved algorithm is practical and feasible. The research has an instructive meaning for sea-bed mining and obstacle avoidance of underwater robot.

Key words: miner; artificial potential field method; obstacle avoidance

机器人在不确定环境下必须依靠传感器不断地感知自身位置和环境信息,同时做出相应的决策以躲避各种障碍物。目前,静态已知环境中的路径规划技术研究已经相当成熟,研究热点集中在复杂未知环境。对于障碍物的信息完全未知的情况,此时对移动机器人来说,最重要的是避障而不是寻求最优的运动规划。

对于海底集矿来说,海底的障碍物多为海丘、海山等一些形状不规则的障碍物,针对海下这种特

殊环境,海底采矿移动机器人在行走的过程中会有遇到障碍物的可能。现有的海底采矿机器人只能越过高度为0.5 m的障碍物,对于高于0.5 m的障碍,只能采取避障的方法^[1-2]。因此,在深海集矿车的导航控制中,路径规划是一个关键的问题,它不仅关系到集矿机是否能顺利完成作业使命,还直接关系到它自身的安全。

深海集矿车路径规划的主要任务是在具有障碍物的环境中,按照一定的评价标准,寻找一条从起

* 收稿日期:2009-12-15

基金项目:中国大洋协会专项基金资助项目(DY105-03-02-02)

作者简介:杨放琼(1966年生),女,副教授,博士研究生;通讯作者:彭高明;E-mail: penggaoming2005@yahoo.com.cn

始状态到达目标状态的无碰撞路径。一般来说有许多路径可供集矿车行走，可事实上需要集矿车必须找到一个最优路径，既能避开障碍物，又能以最小的消耗（如时间）返回预定路径。集矿车路径规划是一个困难的非线性问题，传统的寻优策略因复杂而费时^[3]，难以用于集矿车的实时导航。

路径规划典型的方法有人工势场法^[4-5]、行为控制法^[6]、栅格法等^[7]。其中势场法由于其在数学描述上简洁、美观，便于低层的实时控制，在实时避障和平滑的轨迹控制方面，得到了广泛应用。

1 人工势场法的算法改进

人工势场法由 Khatib^[8]首先提出，最初是用来解决机械臂在操作空间的路径规划问题，其基本思想是构造势函数，其中障碍物产生排斥力，目标点产生吸引力，合力的大小和方向引导机器人运动的速度和方向。人工势场可以视为能量场，机器人总是从势能高的地方向势能低的方向运动，吸引机器人走向目标点，同时被障碍物所排斥。通过设置一个正比于势场力向量的机器人速度向量，可平滑地引导机器人趋向目标点。整个势场可以形象地描述为山峰和峡谷，峡谷的最低点为目标点，山峰为障碍物点，离障碍物距离越近所处的等高线越高。

传统的人工势场法有很多局限性，主要表现为以下几个方面：①陷入局部极小造成“死锁”，形成局部极小，机器人无法继续向目标点前进；②目标点与障碍物靠得太近时，目标点不可达；③目标点附近振荡和多障碍物前抖动甚至无法发现可行路径；④未考虑机器人动力学约束和障碍物速度等因素。

对于海底集矿车，障碍物为静态，同时集矿车的速度较低，故第四个问题可以不予考虑，同时假设目标点位置在前期路径规划中已经考虑到远离障碍物，故局部极小问题成为采用人工势场法避障时最需解决的关键问题。

所谓局部极小是势场排斥力与吸引力的合力在某一点为零，机器人未到达目标点时产生的。机器人会误以为已经到达目标点而停止不前或在某点徘徊，造成机器人永远无法到达最终目标点。如果机器人和目标都在障碍物的影响范围之内，而且障碍物位于机器人和目标之间，尤其在三者位于一条直线上时，容易出现局部极小点问题，这时机器人达不到目标。如图1所示。

为了克服局部极小点，很多学者做了些有益的研究，提出了许多解决方案，如随机化路径规划器

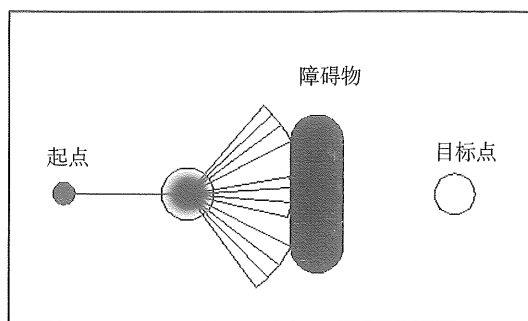


图1 局部极小点问题

Fig. 1 Local minimum problem

RPP (randomized path planner) 法、网络模拟退火算法等^[9-10]。虽然这些方法都能够处理局部极小值问题，但缺乏全局信息，以增加计算时间和多个解为代价^[11]。在此，本文提出一种新的算法以克服局部极小问题。

根据传统的人工势场法，引力场函数为

$$U_{\text{att}}(q) = \frac{1}{2}k_{\text{att}}\rho_{\text{goal}}^2(q) \quad (1)$$

其中， k_{att} 为位置增益， ρ_{goal} 为机器人当前位置 q 与目标位置的相对距离，相应的吸引力为目标势场的负梯度：

$$F_{\text{att}} = -\text{grad}(U_{\text{att}}(q)) = k_{\text{att}}\rho_{\text{goal}}(q) \quad (2)$$

斥力场函数为

$$U_{\text{rep}}(q) = \frac{1}{2}k_{\text{rep}}\left(\frac{1}{\rho(q)} - \frac{1}{\rho_0}\right)^2\rho_{\text{goal}}^2(q) \quad (3)$$

式(3)中， $\rho(q)$ 是机器人与障碍物之间的最近距离， ρ_{goal} 为机器人当前位置 q 与目标位置的相对距离， ρ_0 为障碍物的影响距离。 k_{rep} 为位置增益，为大于零的任意实数。与传统势场函数相比，引入机器人与目标之间的相对距离，保证了整个势场仅在目标点全局最小^[12]。

当机器人未达到目标，即 $\rho_{\text{goal}} \neq 0$ 时，斥力可表示为

$$F_{\text{rep}} = -\text{grad}(U_{\text{rep}}(q)) = \begin{cases} F_{\text{rep1}} + F_{\text{rep2}} & D \leq \rho \leq \rho_0 \\ 0 & \rho > \rho_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中， D 为安全距离，主要由机器人本身的结构及大小确定； F_{rep1} 、 F_{rep2} 可由斥力场函数分别对于 $\rho(q)$ 及 ρ_{goal} 的微分确定，即

$$\begin{cases} F_{\text{rep1}} = k_{\text{rep}}\left(\frac{1}{\rho(q)} - \frac{1}{\rho_0}\right)\frac{1}{\rho^2(q)}\rho_{\text{goal}}^2 \\ F_{\text{rep2}} = k_{\text{rep}}\left(\frac{1}{\rho(q)} - \frac{1}{\rho_0}\right)^2\rho_{\text{goal}} \end{cases} \quad (5)$$

矢量 F_{rep1} 的方向为从障碍物指向机器人，矢量

F_{rep2} 的方向为从机器人指向目标。比较 F_{rep1} F_{rep2} 可知, 只要 $\rho_{goal} \geq 1$, $\frac{F_{rep1}}{F_{rep2}} \geq 1$, 由此可以保证斥力 F_{rep} 的方向为从障碍物指向机器人。

2 履带式集矿机的运动模型

履带式集矿机的转向则是通过调节左右履带的速度差实现。设履带式集矿机的位姿为 $[x, y, \Psi]^T$, 则其质心处的速度 v 和角速度 ω 可以表示为

$$\begin{cases} v = \frac{v_o + v_i}{2} \\ \omega = \frac{v_o - v_i}{b_l} \end{cases} \quad (6)$$

其中, v_o 、 v_i 分别为集矿机转向时外侧和内侧的速度, b_l 为两轮中心距。机器人运动学模型如图 2 所示, 相应的运动学方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\cos\psi}{2} & \frac{\cos\psi}{2} \\ \frac{\sin\psi}{2} & \frac{\sin\psi}{2} \\ \frac{1}{b_l} & -\frac{1}{b_l} \end{bmatrix} [v_o \quad v_i]^T \quad (7)$$

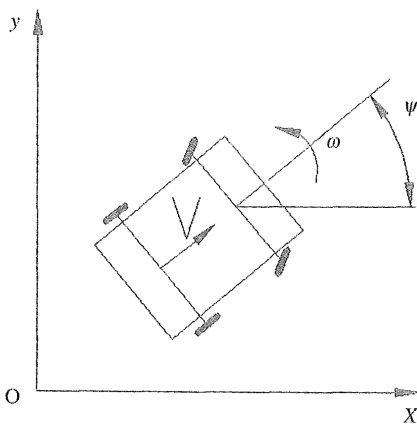


图 2 履带式集矿机运动学模型

Fig. 2 Kinematics model of crawler miner

3 避障过程设计思想

3.1 避障过程设计基本原则

1) 将障碍物形状简化为较为规则的长方形或圆形, 便于实验及仿真;

2) 避障过程一方面要避开障碍物, 另一方面要比较准确地达到目标位置。

3.2 避障过程设计方案

假设有一长方形或圆形的障碍位于起点与目标

点之间, 机器人的原始路径为从起点到目标点的直线。避障过程分为以下几个阶段:

1) 当 $\rho(q) > \rho_0$ 时, 机器人受到的力仅为目标点的引力, 此时机器人按原定的路径前进, 奔向目标;

2) 当 $D < \rho(q) \leq \rho_0$ 时, 此时存在对机器人的引力及斥力, 由于对斥力场函数进行了改进, 仅在目标点位置全局极小, 同时选择合适的系数 k_{att} 及 k_{rep} , 则可保证引力大于斥力, 机器人仍按原定的路径前进, 且不会陷入局部极小;

3) 当 $\rho(q) = D$ 时, 机器人进入避障程序, 通过调节机器人左右两轮的速度实施转向, 此时机器人的避障方式为沿障碍行走;

4) 当机器人基本脱离障碍物时, 利用障碍物对机器人的斥力以及目标对机器人的引力使机器人避开侧面的障碍物, 顺利直达目标。

对于履带式集矿机, 由于其自量大, 惯性大, 因此, 转向角度应尽可能的小, 在避障时, 安全距离 D 应取较大值, 实现缓慢转向, 使其运动轨迹尽量平滑。

4 集矿机避障仿真结果

4.1 深海采矿集矿机测控系统硬件构成

图 3 为履带式海底集矿机 ROV 模型机, 它携带多种传感器与集矿头行走于海底, 收集锰结核等多种矿石, 它由水力式集矿机构、破碎机构、履带式行走机构、液动力系统、测控系统及软管连接装置等组成, 采用两台高压电机分别驱动 2 台油泵, 利用油马达驱动左右履带、4 台水泵和破碎机, 实现集矿机的行走、集矿和破碎, 采用油缸调节集矿头的姿态和离底高度。

集矿机控制系统由海上采矿母船与海底集矿机两级控制系统构成, 如图 4 所示。其中, 水上监控子系统位于海上采矿母船上, 包括集矿机监控与控制主操作台及计算机、声学定位系统监控、图像声呐的监视计算机、视频信号监视器和摄像机及相应的动力控制柜等。水下测控子系统核心位于集矿机的密水电子仓中, 由一台 COMPACT PCI 工控机及相关硬件电路构成。因此, 集矿机控制系统为两级 PC-PC 控制系统。集矿机传感系统与行走有关部分由左右轮速度传感器、量测集矿机姿态的磁罗盘、左右履带沉陷声呐构成。另外, 还有用于环境检测和粗略定位的视频摄像、图像声呐、测障声呐、水声定位系统应答器以及用于监听结核流采集效率的结核流麦克风等。

集矿机基本参数如下：

设计水深：6 000 m 行驶速度：0 - 1 m/s
 外形尺寸：6 m × 5.3 m × 3.5 m
 空中自重：24 水中自重：11 t
 在越障条件下，集矿机工作性能参数如下：
 爬坡能力：15° 左右倾斜：±20°
 越障高度：0.5 m 越沟宽度：1 m

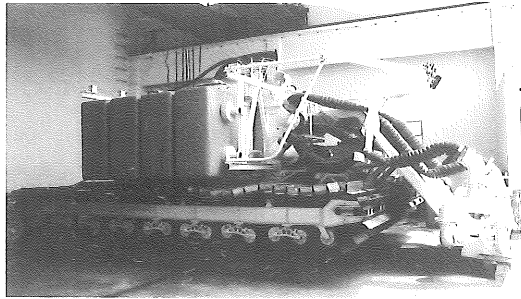


图 3 履带式海底集矿机
 Fig. 3 Under-sea crawler miner

4.2 集矿机避障系统软件设计

避障系统软件包括两个部分：声呐数据的融合处理及避障算法的实现。由于海洋环境是不确定、非结构化和部分未知的，机器人利用避障声呐在线得到的局部环境信息具有较强的不确定性，需要进行数据的融合处理。其中，避障处理程序流程如图 4 所示。

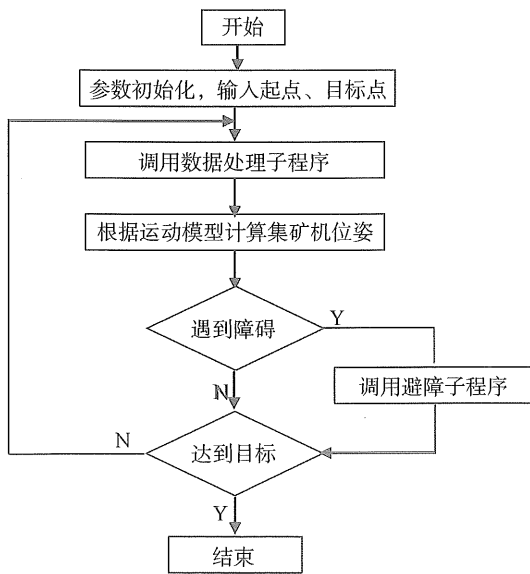


图 4 避障程序流程

Fig. 4 Flow chat for obstacle avoidance program

4.3 仿真结果

仿真参数：

集矿机速度：0.5 m/s 安全距离：5 m
 长方形障碍物：15 m × 8 m
 圆形障碍物：直径 18 m
 声呐测量距离：20 m

仿真结果如图 5 所示。障碍物边线较粗处表明被测障声呐监测到，并经过 SOG 融合处理及特征提取，由图可知，经过处理后得到的障碍物地图与实际轮廓较为接近，证明了数据处理融合算法的有效性，同时，机器人能避开障碍物，顺利到达目标点，且轨迹较为平滑。仿真结果验证了该算法能有效地避障。

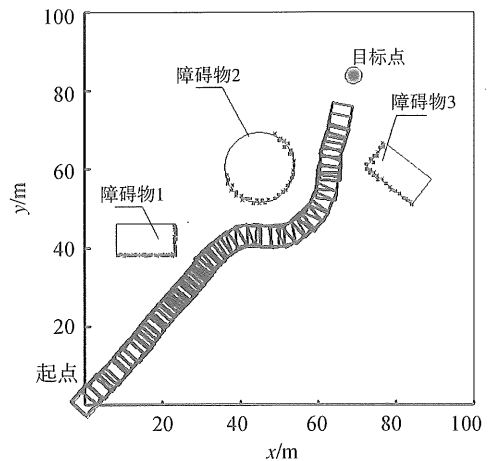
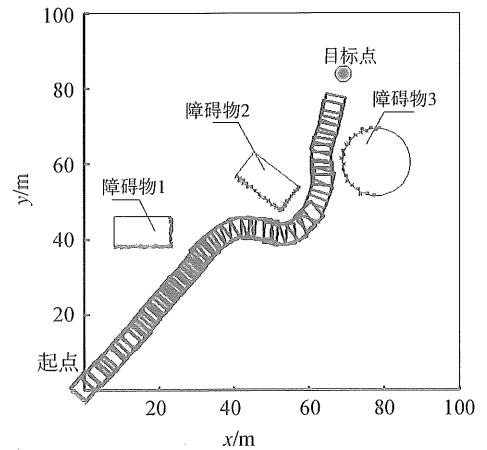


图 5 集矿机避障仿真结果

Fig. 5 Simulation results for obstacle avoidance of miner

5 结 语

针对不确定环境下机器人实时避障问题，采用传统的人工势场法存在局部极小点的缺陷，重新定

义势函数, 提出了改进算法的人工势场法, 与传统势场函数相比, 引入机器人与目标之间的相对距离, 保证了整个势场仅在目标点全局最小。实验及仿真结果表明: 机器人能跳出局部极小点, 顺利到达目标。

参考文献:

- [1] 韩庆珏, 刘少军, 金燕. 海底采矿移动机器人的避障研究[J]. 机电工程技术, 2006, 35(1): 46 - 46.
- [2] 戴圣伟, 王随平, 罗飞. 基于深海采矿车的避障规划模糊控制器的研究[J]. 湖南工业大学学报, 2009, 23(1): 79 - 82.
- [3] 廖平, 傅杰. 基于遗传算法的深海集矿车避障路径规划方法[J]. 机电工程技术, 2006, 35(3): 40 - 42.
- [4] MASOUD A A, BAYOUMI M M. Robot navigation using the vector potential approach[C]//Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. 1993.
- [5] MASOUD A A, MASOUD S A. Motion planning in the presence of directional and obstacle avoidance constraints using nonlinear, anisotropic, harmonic potential fields [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics & Automation, San Francisco, CA, 2000.
- [6] BROOKS R A. A robust layered control system for a mobile robot[J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1986, 2(1): 1.
- [7] ELFES A. Sonar - based real - world mapping and navigation [J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1987, 3(3): 249 - 265.
- [8] KHATIB O. Real - time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots in proc [C] // IEEE Int Conf On Robotics and Automation, 1985: 500 - 505.
- [9] 吴晓涛, 孙增圻. 基于网络结构的并行路径规划算法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1996, 36(5): 67 - 71.
- [10] MARTINEZ A H, FLUGRAD D R. Collision - free path planning for mobile robots and/or agvs using simulated annealing[J]. Proc of International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 1994, 1: 270 - 275.
- [11] 黄炳强, 曹广益. 基于模糊人工势场的移动机器人路径规划[J]. 上海理工大学学报, 2006, 28(4): 347 - 350.
- [12] 吴镜开, 黄远灿, 王世兴. 基于势场法的移动机器人避障路径规划[J]. 微计算机信息, 2007, 23(2): 228 - 230.

(上接第 57 页)

- [3] SHEN Z, ANDREWS J G, EVANS B L. Adaptive resource allocation in multiuser OFDM systems with proportional fairness [J]. IEEE Trans Wireless Communication, 2005, 4(6): 2726 - 2737.
- [4] WONG I C, SHEN Z, ANDREWS J G, et al. A low complexity algorithm for proportional resource allocation in OFDMA systems [C] // IEEE SIPS' 04, Austin, USA, 2004, 1: 1 - 6.
- [5] SHEN Z, ANDREWS J G, EVANS B L. Optimal power allocation in multiuser OFDM systems [C] // IEEE Global Communications Conference, December 2003, 1: 337 - 341.
- [6] CHUNG S T, GOLDSMITH A. Degrees of freedom in adaptive modulation: A unified view [J]. IEEE Transactions on Communications, 2001, 49: 1561 - 1571.
- [7] SONG G, LI Y. Cross-layer optimization for OFDM wireless networks: theoretical framework [J]. IEEE Trans Wireless Commum, 2005, 4(2): 614 - 634.
- [8] 杨大成. 移动传播环境 [M]. 北京: 北京机械工业出版社, 2003.
- [9] SONG G, LI Y. Cross-layer optimization for OFDM wireless networks-part II: algorithm development [J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2005, 4: 625 - 634.
- [10] CHEN Y F, CHEN J W. A fast subcarrier, bit, and power allocation algorithm for multiuser OFDM-based systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57: 873 - 881.
- [11] HUANG X Z, WU H C, WU Y Y. Novel pilot-free adaptive modulation for wireless OFDM systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57: 3863 - 3867.
- [12] HAN Z, JI Z, LIU K. Fair multiuser channel allocation for OFDMA networks using nash bargaining solutions and Coalitions [J]. IEEE Trans Commun, 2005, 53: 1366 - 1376.
- [13] YU G, ZHANG Z, CHEN Y, et al. Subcarrier and bit allocation for OFDMA systems with proportional fairness [C] // IEEE WCNC'06, Las Vegas, USA, 2006, 3: 1717 - 1722.