

## 基于高斯模型的核探测机器人寻找核辐射源方法<sup>①</sup>

钱 菱<sup>②</sup> 宋爱国<sup>③</sup> 熊鹏文 张立云

(东南大学仪器科学与工程学院 南京 210096)

**摘 要** 针对核泄露后核放射源准确定位的问题,提出了用核探测机器人自主寻找核辐射源的方法。该方法利用高斯模型描述核泄漏事故发生后周围大气中放射性核素云团的扩散,估测地面上放射性核素水平,并利用小型核探测机器人搭载核辐射探测器,实时探测核辐射水平;根据建立的核污染扩散模型,采用模拟退火算法,自主寻找地面放射性核素辐射浓度最高的区域;通过基于超声模糊避障控制系统,保证机器人在执行任务中无碰撞。模拟核辐射源泄漏事故实验结果表明,该方法可以帮助机器人自主寻找到地面核素辐射水平最高区域。

**关键词** 放射性核素云团,高斯模型,小型核探测机器人,辐射源,模糊控制

### 0 引言

核事故的发生会导致人员遭受辐射损伤和财产损失<sup>[1]</sup>。发生核事故时,首先要迅速、准确地查明核辐射源及受污染地域的核辐射污染程度,然后迅速采取正确的处理措施。如何在核事故发生后进行快速应急监测与处理则成为核安全领域的重要课题。

传统核事故处理常用人工携带核探测器徒步搜寻核放射源<sup>[2]</sup>,探寻受染区域,但这往往造成探测人员伤亡。针对这种情况,人们采用了让移动机器人进入事故现场进行探测的有效手段。目前,这方面的研究已取得一定进展。Kenyon 等<sup>[3]</sup>设计了小型探测机器人系统,研制了一个用于室内探测监视的半自主移动机器人样机,可被携带和扔进室内。谈伟飞等<sup>[4]</sup>研究了用于反核与辐射恐怖现场的可视化遥控探测测量技术,设计出一套完整的以小型遥控车为移动平台的可进行放射性强度监测与报警的核辐射探测机器人方案。北京航空航天大学陈殿生等<sup>[5]</sup>设计了小型地面侦察机器人移动载体技术,提出了提高机器人地形适应能力的带前摆臂的双节地面移动机器人结构。李怀兵等<sup>[6]</sup>提出了核辐射探测与应急处理机器人的小型机械臂系统设计,以

满足核辐射应急处理的需求。东南大学<sup>[7]</sup>与南京某单位合作研制了一款小型核探测机器人,其本体采用带前导臂的履带式设计,具有楼梯攀爬、障碍跨越等很强的运动能力,是一种可远距离遥控操作的具有核探测、测量、取样、现场紧急情况处理功能的小型移动作业平台。可见,将机器人用于公共安全领域的防范和处理核应急事件,已经成为趋势。但目前机器人工作方式还是以遥控操作<sup>[8]</sup>为主,对于机器人自主寻找核放射源还少有文献涉及。因此,本项目针对核泄露事故中核放射源准确定位问题,进行了核探测机器人自主寻找核辐射源的研究。本研究建立了放射性核素云团的污染扩散模型,并采用实验室自主研发的小型核探测机器人,搭载核辐射探测器,实时探测核辐射强度;采用模拟退火算法,自主找到地面放射性核素辐射水平最高的区域,为事故处理人员快速找到核辐射源提供依据;设计了基于超声模糊避障控制系统,保证机器人在执行趋向地面核素辐射水平最高区域任务中无碰撞。

### 1 放射性核素云团建模

#### 1.1 模型选择

核事故发生后,会向空气中散发大量放射性气

① 863 计划(2006AA04Z246)和教育部重大创新工程培育资金(708045)资助项目。

② 男,1987 年生,博士生;研究方向:移动机器人,智能控制;E-mail: qiankui\_99@126.com

③ 通讯作者,E-mail: a. g. song@seu.edu.cn

(收稿日期:2012-05-07)

体,这些放射性气体与空气混合形成放射性核素云团,放射性核素云团经大气扩散后,在短时期内会对环境产生大范围的影响<sup>[9]</sup>。进行核事故应急响应决策时,放射性核素云团迁移与扩散过程的模拟是非常重要的。在进行扩散模拟时,需要先根据大气动力学理论<sup>[10]</sup>对受染地域的大气环流进行计算,利用大气运动方程、连续性方程、状态方程和热力学方程等构建基本方程组。再采用类似处理大气污染的方法,假设放射性核素云团不影响大气流体速度与温度,求解放射性核素的连续性方程。

在目前大气污染扩散的研究中,主要的扩散模型有高斯模型<sup>[11]</sup>和蒙特卡罗模型<sup>[12]</sup>。相对于高斯模型,蒙特卡罗模型更能反映湍流扩散的本质,对非均匀非定常和有强切变的复杂流场(如海陆风,山谷风)条件下的大气污染物扩散模拟计算效果良好,但其收敛速度慢,误差具有概率性。而高斯模型由于提出时间比较早,实验数据多,因而较为成熟。该模型简单,计算量小,且计算结果能与实验值较好地吻合。目前美国环境保护协会(EPA)所采用的许多标准均是以高斯模型为基础建立的,因此高斯模型得到广泛的应用。本文研究核电站或核装置发生泄漏事故后的放射性核素云团的迁移与扩散模型采用高斯模型。

1.2 模型的建立

放射性核素云团的迁移与扩散模型假设放射性核素的分子扩散相对于湍流可忽略,大气是不可压缩的,不考虑放射性元素间的化学反应,放射性核素云团的连续性方程<sup>[13]</sup>为

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i c) = \frac{\partial}{\partial x_i}(k_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j}) + s(\vec{x}, t) \quad (1)$$

式中: $c$ 为放射性核素云团中放射性物质的浓度; $t$ 为放射性核素云团自瞬时释放时刻起至测量辐射水平时刻的时间; $u_i$ 是风速的第 $i$ 分量; $x_i$ 是放射性核素所在位置的第 $i$ 分量; $k_{ij}$ 为扩散系数, $s(\vec{x}, t)$ 为在位置 $\vec{x}, t$ 时刻时,核泄漏装置中的核放射源释放率, $\vec{x}$ 为 $(x, y, z)$ 。

不计放射性核素自身的衰减、沉降和冲刷,设放射性核素云团是源于位置 $(x_0, y_0, z_0)$ 的瞬时点源,根据欧拉公式<sup>[14]</sup>可得到标准的放射性核素云团放射性浓度公式为

$$c(x, y, z, t) = \frac{S}{2 \sqrt{2\pi}^{\frac{3}{2}} (\sigma_{xx} \sigma_{yy} \sigma_{zz})^{\frac{1}{2}}} \times \exp\left[-\frac{(x - x_0 - u(t))^2}{2\sigma_{xx}} - \frac{(y - y_0)^2}{2\sigma_{yy}}\right]$$

$$\times \exp\left[-\frac{(z - z_0)^2}{2\sigma_{zz}} - \frac{(z + z_0)^2}{2\sigma_{zz}}\right] \quad (2)$$

式中: $S$ 为源强,是一常数; $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$ 为扩散参数。假设放射性核素云团的扩散不依赖于水平方向和垂直方向, $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_r, \sigma_{zz} = \sigma_z$ ,只与时间有关,由此可以得到文献[15]的高斯公式。在直角坐标系中原点取 $(0, 0, 0)$ ,在地面上距离放射性核素云团中心水平距离 $R$ 处的放射性核素的相对浓度(归一化浓度)为

$$C(R, t) = \frac{e^{-\frac{1}{4t}(\frac{R^2}{\sigma_r})} e^{-\frac{z^2}{4\sigma_z t}}}{4(\pi t)^{1.5} (\sigma_r \sigma_r \sigma_z)^{0.5}} \quad (3)$$

1.3 参数选取

在放射性核素云团扩散过程模型中所需参数的选取及确定十分重要,通常情况下气象参数的选取是利用该地区多年气象资料,采取工业安全与环保统计的方法进行有关参数的确定。根据国家标准(GB/T 13201-1991)制定地方大气污染物排放标准的技术方法的规定,划分大气稳定度的级别,共分为A-F 6级(表1),A为极不稳定级,F为极稳定级。

表1 大气稳定度级别

| 地面风速<br>(m/s) | 白天太阳辐射 |     |   | 阴天的白<br>天或夜间 | 有云的夜晚                  |                  |
|---------------|--------|-----|---|--------------|------------------------|------------------|
|               | 强      | 中   | 弱 |              | 薄云遮天或<br>低云 $\geq 0.5$ | 云量<br>$\leq 0.4$ |
| <2            | A      | A-B | B | D            | -                      | -                |
| 2-3           | B      | B   | C | D            | E                      | F                |
| 3-5           | B-C    | B-C | C | D            | D                      | E                |
| 5-6           | C-D    | C-D | D | D            | D                      | D                |
| >6            | C      | D   | D | D            | D                      | D                |

采用 Briggs 内插公式法,在确定大气稳定度后,在表2中找到相应的内插公式,得到相应的扩散参数。

表2 Briggs 扩散参数

| 大气<br>稳定度 | $\sigma_r$                 | $\sigma_z$                 |
|-----------|----------------------------|----------------------------|
| A         | $0.22x(1 + 0.0001x)^{0.5}$ | $0.2x$                     |
| B         | $0.16x(1 + 0.0001x)^{0.5}$ | $0.12x$                    |
| C         | $0.11x(1 + 0.0001x)^{0.5}$ | $0.08x(1 + 0.0002x)^{0.5}$ |
| D         | $0.08x(1 + 0.0001x)^{0.5}$ | $0.06x(1 + 0.0015x)^{0.5}$ |
| E         | $0.06x(1 + 0.0001x)^{0.5}$ | $0.03x(1 + 0.0003x)$       |
| F         | $0.04x(1 + 0.0001x)^{0.5}$ | $0.016x(1 + 0.0003x)$      |

利用高斯公式法,可以在核电站或核装置发生

泄漏事故后,进行受染地域内放射性核素辐射水平随时间与空间而变化的计算,了解放射性核素的浓度分布,对事故早期应急响应决策起到指导性作用。

以上讨论均假定事故现场为空旷环境,其地面放射性核素浓度三维图如图 1 所示。但真实环境中往往有障碍物存在,核辐射会被障碍物区域部分吸收,干扰机器人自主寻找放射源任务。因此,有必要建立有障碍物环境下的高斯扩散模型,并且要求机器人能够无碰撞趋向地面放射性核素浓度最高的区域。

$\gamma$ 、X 粒子在通过任何物质时,按指数规律衰减, $\gamma$  或 X 辐射经过障碍物后其核辐射剂量率为  $D_i = D_0 e^{-\mu x}$ ,  $D_0$  是经过障碍物之前的剂量率,  $D_i$  是穿透后的剂量率,  $\mu$  是障碍物材料的线吸收系数。因此放射性核素云团在经过障碍物区域时,放射性浓度会明显降低,如图 2 所示。

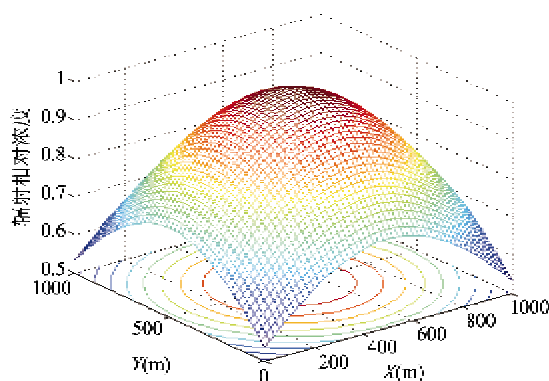


图 1 无障碍环境地面放射性核素浓度三维图

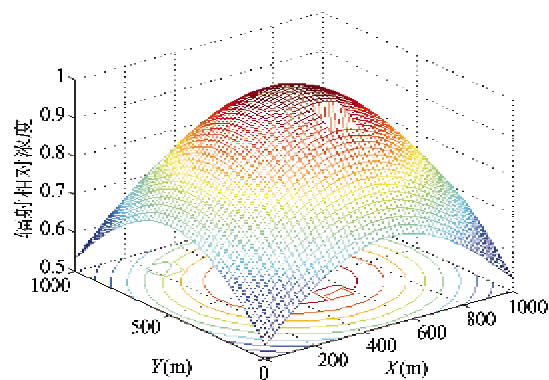


图 2 放射性核素云团经过障碍物区域浓度三维图

由以上建立的高斯模型可以看出,地面上放射性核素相对浓度值随云团的迁移与扩散的时间而减小,随着与核放射源的距离增大而减小。在核事故发生后,首要任务就是尽快预测放射性核素云团扩散过程,对核素云团的辐射水平进行跟踪<sup>[16]</sup>。本文采用实验室自主研发的小型核探测机器人,实时探

测核辐射强度,并利用模拟退火算法,有效地寻找到地面核辐射水平最高的区域,完成核素辐射水平跟踪任务,为寻找核辐射源提供了依据。同时设计了基于超声模糊避障控制系统,保证机器人在执行任务中无碰撞。在此过程中,放射性核素云团迁移与扩散可忽略不计。

## 2 模拟退火算法

### 2.1 模拟退火基本思想

根据上述的放射性核素云团扩散的高斯模型,采用模拟退火算法,找到核事故现场地面放射性核素浓度最高的区域。模拟退火算法<sup>[17]</sup>是一种通用概率算法,用来在一个大的搜寻空间内找寻命题的最优解。原理是依据金属物质退火过程和优化问题之间的相似性。物质在加热时,粒子间的布朗运动增强,粒子随着温度的升高内能增大而有序排列,到达一定强度后再退火,粒子热运动减弱并逐渐趋于有序,最后到达稳定。模拟退火可由式

$$P|\bar{E} = E(r)| = \frac{1}{Z(T)} \exp\left(-\frac{E(r)}{K_B T}\right) \quad (4)$$

描述,其中  $\bar{E}$  表示分子能量的一个随机变量,  $E(r)$  表示状态  $r$  的能量,  $K_B > 0$  为 Boltzmann 常数,  $T$  为温度,  $Z(T)$  为概率分布的标准化因子,

$$Z(T) = \sum_{s \in D} \exp\left(-\frac{E(s)}{K_B T}\right) \quad (5)$$

其基本思想为在一定温度下,搜索从一个状态随机地变化到另一个状态,随着温度的不断下降直到最低温度,搜索过程以概率 1 停留在最优解。

### 2.2 模拟退火基本步骤

(1) 设定初始温度为  $T$ , 温度下降系数  $R$ , 任选初始解状态  $S$ 。

(2) 内循环,从  $S$  的邻域随机产生一个新解  $SS$ , 计算对应目标函数值,如果新的目标函数值小于上一目标函数值,则  $S = SS$ , 否则以  $\min(1, \exp(-\frac{E(r)}{K_B T}))$  概率接受新解。当不满足内循环条件时,循环终止。

(3) 外循环,即降温过程,  $T = R \times T$ , 如果不满足外循环停止条件,则继续第(2)步,否则算法停止。

## 3 模糊控制器

机器人在实际运动中,面对的往往是未知的复

杂环境,因此很难建立精确的数学模型来预测障碍物位置。模糊控制<sup>[18]</sup>是基于规则的控制,直接采用语言型控制规则,对于那些数学模型难以获取、动态性能不易掌握或变化非常显著的对象非常适用,因此采用模糊避障算法<sup>[19]</sup>非常适合移动机器人的避障。

图3为小型核探测机器人模糊控制的隶属度函数,输入为机器人前端超声波传感器探测的距离数据,输出为机器人转动角度。

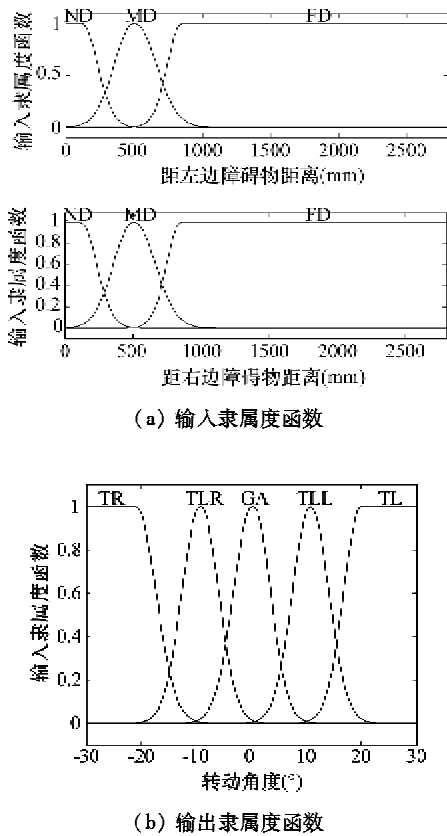


图3 隶属度函数图

模糊控制器的输入是超声波传感器的距离信号,输出是机器人的动作,前进或旋转。导航任务的模糊避障流程如图4所示,其核心思想就是构造一个障碍物距离阈值来协调模糊避障与导航,在无障条件下,导航模式采用模拟退火算法,寻找核泄漏事故现场核素辐射水平最高区域,为事故处理人员找到核放射源位置提供依据。当两侧障碍物距离大于500mm时,可认为安全距离,这时小型核探测机器人根据携带的核探测仪,执行寻找核放射源任务,当距离小于500mm时,则认为障碍物存在,开启模糊控制器,实施避障。

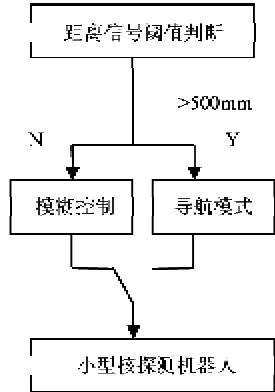


图4 模糊控制流程图

## 4 小型核探测机器人平台

### 4.1 机器人本体

采用实验室自主研发的小型核探测机器人(图5),机器人本体采用带前导臂的履带式设计,具有攀爬楼梯,跨越障碍物等很强的运动能力,是一种可远距离操作的具有核探测、取样、现场紧急情况处理功能的小型移动作业平台。主要用于核污染情况下,进入人员无法到达、高度危险情况不明区域,执行核辐射、声音、图像探测及样品采集、辐射源处理等危险物的现场处置任务。

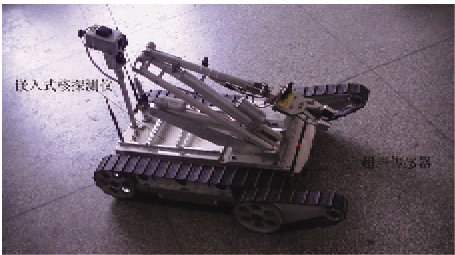


图5 小型核探测机器人

本文利用机器人配备的核辐射测量装置监测核辐射强度,并根据建立的核污染模型,利用模拟退火算法,自主寻找地面辐射最高的区域,帮助事故处理人员快速找到核辐射源。同时为了机器人顺利执行任务,设计了基于超声模糊避障控制系统,保证机器人不与障碍物发生碰撞。

### 4.2 嵌入式核探测仪

针对辐射污染水平的探测,研制了一款在低量程端测量灵敏度较高的装置,如图6所示。该仪器的测量内容:X射线、 $\gamma$ 射线。低量程端探测器采用XX型小型钟罩管,计数灵敏度较高,读数建立时间为5s;高量程端探测器采用J441型计数管。仪器采

用了先进的计数前时间(count-to-time)测量技术,可拓宽计数管的测量范围、延长计数管的使用寿命。仪器采用标准 RS232 接口作为仪器操作、标定、功能设置、测量结果输出的通讯端口。

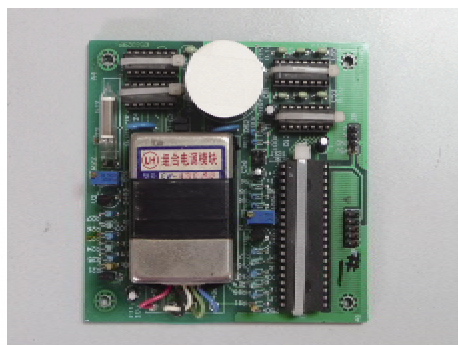


图 6 核探测仪模块

### 4.3 核辐射水平监控界面

小型核探测机器人在核事故现场执行任务时,自身携带的摄像头拍摄的画面及核探测仪测得的核辐射水平通过无线通讯传输回远程监控端。图 7 中标号 1 为核辐射强度测量值,单位为微西弗/时,标号 2 为小型核探测机器人搭载仪器舱中的生化毒气测量仪器。



图 7 远程监控画面

## 5 模拟核放射源泄漏实验

根据上述介绍,只要选取足够高的温度  $T$  与合适的温度下降速度,经过多次迭代,系统总是能达到能量最小的状态。为验证本文提出的算法的可行性,利用模拟核放射源与烟雾发生器,模拟了核放射源泄漏事故现场,并形成放射性核素云团(见图 8)。考虑到日本福岛核电站事件中泄露出来的放射物元素有碘、铯、氢、氙、氪等,但生命力顽强、有扩散危险的基本只有碘-131 和铯-137 两种元素。因此模拟核放射源辐射值与核素碘-131 相当,值得一提的是

当瞬间接受辐射量低于 100 毫西弗时,对人体没有危害。

在核放射源发生泄漏事故后,为实现小型核探测机器人自主寻找放射源任务,采取的参数是:温度  $T=200$ ;为了提高收敛速度,温度下降系数  $R=0.5$ ;最小温度  $T_{\min}=0.001$ ;机器人初始坐标设置为(0,0),步长初始值为 0.5m。并设置了两种不同的实验环境,即无障碍开阔环境与有障碍复杂环境。



(a) 实验环境



(b) 人机交互界面

图 8 模拟核放射源泄露事故现场

放射性核素云团在小型核探测机器人进入现场后的扩散可忽略不计。在无障碍物开阔环境下,从图 9 可以看出,机器人从起点开始寻找,在初始温度较高时在局部最优点徘徊,但随着温度的降低,机器

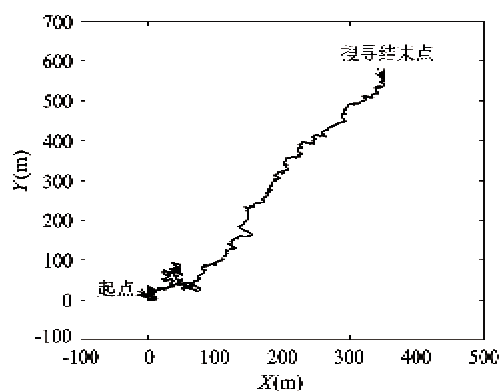


图 9 无障碍环境机器人寻找辐射源路径

人逐渐朝全局最优点移动,即趋向地面核素辐射水平最高区域,体现了算法的效率。图 10 显示的测试

核辐射强度水平体现了机器人一直在向高辐射水平区域搜索前进,与其放射性核素云团高斯分布模型的浓度变化趋势基本一致,这表明在模拟核放射源泄露情况下,机器人能很好地满足核素辐射水平跟踪任务,可以有效找到地面核素辐射水平最高区域,为事故处理人员快速找到核放射源提供依据。

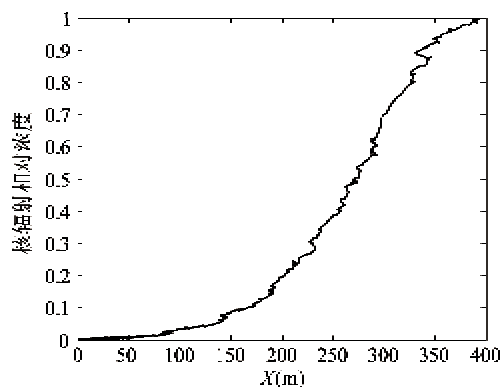


图 10 无障碍环境机器人测量核辐射强度

图 11 给出了在有障碍复杂环境下机器人寻找辐射源的路径。从图中可以看到,在温度较高时,机器人在局部最优点徘徊,随着温度降低,逐步向放射源移动,在遇到障碍物时,根据模糊控制器计算出机器人偏转的方向,避开障碍物,直至成功找到放射源。

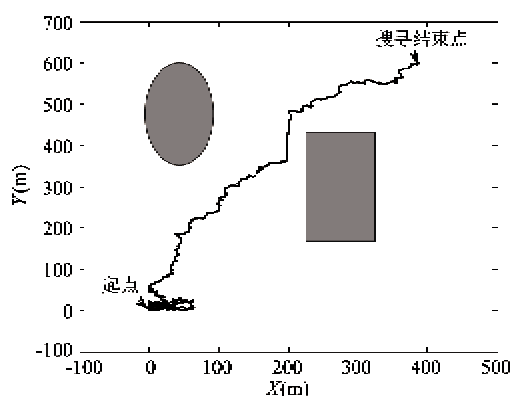


图 11 有障碍复杂环境下机器人寻找辐射源路径

## 6 结 论

本文建立了放射性核素云团的污染扩散高斯模型,并采用实验室自主研发的小型核探测机器人,搭载核辐射探测仪,实时探测核辐射强度,采用模拟退火算法,自主找到地面放射性核素辐射水平最高的

区域,为事故处理人员快速找到核辐射源提供依据。同时设计了基于超声模糊避障控制系统,保证机器人在执行趋向地面核素辐射水平最高区域任务中无碰撞。

本文不足之处在于实际发生核泄露事故后,现场情况比文中讨论情况更加复杂,需要考虑众多实际因素,因此未来工作主要是完善核辐射模型,并综合考虑地形、风速、风向对核辐射扩散的影响,同时进一步优化寻找放射源路径算法,设计鲁棒性更强的主动搜寻策略,提高搜索效率。

## 参考文献

- [1] 刘华,赵永明,潘苏等. 放射源安全管理现状及对策. 辐射防护,2009,22(5): 272-276
- [2] 刘新华,李冰,吴德强. 位置未知的废放射源的搜寻. 辐射防护通讯,2002,22(5): 11-16
- [3] Kenyon S H, Creary D, Thi D, et al. A small, cheap, and portable reconnaissance robot. *Proceeding of the SPIE*, 2005, 5778: 434-443
- [4] 谈伟飞,李志荣,邵晖. 遥控核辐射探测机器人的研究. 见:全国第一届核技术与公共安全学术研讨会论文集, 丹东, 2007. 334-337
- [5] 陈殿生,杨喜,李强. 小型地面侦察机器人移动载体技术研究. 机器人技术与应用,2006,6: 43-46
- [6] 李怀兵,张韬懿,丑武胜. 核辐射探测与应急处理机器人的小型机械臂系统设计. 高技术通讯,2011,21(1): 101-105
- [7] Bao J T, Guo Y, Song A G, et al. A multi-agent based robot telesupervision architecture for hazardous materials detection. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Information and Automation*, Harbin, China, 2010. 2428-2432
- [8] 郭建光,符秀辉. 网络机器人遥操作实现研究. 仪器仪表学报, 2005,26(8): 477-478
- [9] 蔡旭晖,陈家宜,康凌. 核事故条件下的大气扩散模式及应用. 辐射防护, 2003, 23(5):293-299
- [10] 刘式适,刘式达编著. 大气动力学. 北京: 北京大学出版社,1999
- [11] 周波,张国枢. 有害物质泄漏扩散的数值模拟. 工业安全与环保,2005,31(10):42-44
- [12] 闫政,杨亚新,张叶等. 核事故早期烟羽的蒙特卡罗模拟. 东华理工大学学报(自然科学版),2009,32(4): 358-361
- [13] 李华,邓继勇,王旭辉等. 用高斯模型计算大气中放射性核素云团的扩散. 辐射防护,2004,24(2): 92-99
- [14] Seinfeld J H. *Atmospheric chemistry and physics of air pollution*. NewYork: JONH WILEY& SONS, 1985. 23-

29

- [15] Edenburn M W, Bunting M L, Payne A C, et al. CTCT Integrated verification System Evaluation Model; [ Technical Report ], Sandia National Laboratory, 1997, SAND97-2518
- [16] Ishida H, Nakayama G, Nakamotor T, et al. Controlling a gas/Odor plume-tracking robot based on transient of gas sensors. *IEEE Sensors Journal*, 2005, 5(3):537-545
- [17] 高珊. 基于改进的模拟退火算法的自主移动机器人路径规划的研究:[ 硕士学位论文 ]. 中国海洋大学, 2009. 37-45
- [18] 李庆忠, 顾伟康, 叶秀清等. 移动机器人模糊控制方法研究. *仪器仪表学报*, 2002, 23(5): 480-483
- [19] 钱夔, 宋爱国, 章华涛等. 基于自适应模糊神经网络的机器人路径规划方法. *东南大学学报(自然科学版)*, 2012, 42(4):637-642

## A Gaussian model based method for nuclear detection robots to locate radiation sources

Qian Kui, Song Aiguo, Xiong Pengwen, Zhang Liyun

(Department of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096)

### Abstract

To achieve the accurate location of the nuclear radiation source when a nuclear leakage accident happens, this paper presents a method of using nuclear detection robots to autonomously search the nuclear radiation source. The method is characterised below: The Gaussian model is used to describe the spread of radionuclide clouds after a nuclear leakage accident happens and estimate the radiation level of radionuclides on the ground; The intensity of nuclear is measured real-time using a small nuclear reconnaissance robot equipped with a nuclear radiation meter; The simulated annealing algorithm is used to autonomously find the radionuclide area with the highest radiation concentration according to the established nuclear pollution dispersion model; and an obstacle avoidance system based on fuzzy control using ultrasonic sensors is used to ensure robot collision-free. The simulation experiments on nuclear leakage accident were conducted, and the results show the method can help a robot autonomously to find the highest radiation level of radionuclide on the ground.

**Key words:** radionuclide clouds, Gaussian model, small nuclear detection robot, radiation source, fuzzy control