

# 基于蚁群算法的完全遍历路径规划研究

张赤斌 王兴松

东南大学,南京,211189

**摘要:**提出了一种局部区域遍历和全局运动规划相结合的完全遍历路径规划方法;针对基于Boustrophedon单元分解所得区域的特点,机器人可在局部区域内采用往复运动的方式实现遍历。该方法定义了遍历空间中子区域间综合连通距离,综合连通距离包括区域之间的连通关系、区域之间的最短距离、区域之间的障碍物情况等要素,整个遍历空间中的连通关系由一个完全赋权连通矩阵表示。采用蚁群算法对子空间遍历距离进行优化,得到了最短全局遍历顺序。最后以一个模拟环境为求解实例,证明了算法的有效性。

**关键词:**移动机器人;完全遍历路径规划;蚁群算法;完全赋权连通矩阵

**中图分类号:**TP312

**文章编号:**1004—132X(2008)16—1945—05

## Complete Coverage Path Planning Based on Ant Colony Algorithm

Zhang Chibin Wang Xingsong

Southeast University, Nanjing, 211189

**Abstract:** A complete coverage path planning algorithm integrating local region coverage with global planning was proposed. According to the characteristics of Boustrophedon cellular decomposition, the robot covered local region through back and forth motion. The distance among every regions was redefined, what including connectivity, least distance, and number of obstacles among regions. The new distance matrix of regions in environment was built for global planning. Based on ant colony algorithm, the robot used the distance matrix to get the optimization sequence of the regions after decomposed the coverage environment. Experiments under simulation environment verify the validity of the proposed algorithm.

**Key words:** mobile robot; complete coverage path planning; ant colony algorithm; complete weighted connected matrix

## 0 引言

完全遍历路径规划(complete coverage path planning, CCPP)是一种特殊的路径规划,它要求移动机器人在满足一定的指标下完全覆盖目标环境中的可达区域,可应用于清洁机器人、割草机器人、排爆机器人等领域。常用的完全遍历路径规划性能评价指标有遍历效率、遍历面积百分率、遍历重叠率、能量损耗等<sup>[1,2]</sup>。

完全遍历路径规划算法包括模板模型法<sup>[3]</sup>、单元分解法<sup>[4]</sup>等。模板模型法对整个环境缺乏整体的规划,效率较低且机器人往往会进入无法处理的死循环状态<sup>[5,6]</sup>,难以适应环境变化<sup>[7]</sup>。单元分解法是根据障碍物分布情况将环境空间划分为一系列不重合的、有限个数的、无障碍物的子区

域,而后在此基础上进行每个区域的遍历。Boustrophedon单元分解法是一种精确单元分解法<sup>[8]</sup>,基于这种分解思想的单元具有以下特点:单元必有两条边是平行的,而其他边是障碍物的边界或者环境的边界。将全部遍历空间分解为若干子区域后,全局路径规划就转换为遍历所有子区域,这就非常类似旅行商问题(traveling salesman problem, TSP)。20世纪90年代Dorigo等从生物进化的机制中受到启发,通过模拟自然界蚂蚁搜索路径的行为,提出一种新型的模拟进化算法——蚁群算法,该算法是群智能理论研究领域的一种主要算法<sup>[9,10]</sup>。本文采用Boustrophedon单元分解法将全部遍历区域分解为若干子区域,在实现单个子区域的遍历基础上,采用蚁群算法确定子区域的遍历顺序,该算法在复杂度和快速收敛性两方面优于其他算法。

收稿日期:2008—04—24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50475076);国家863高技术研究发展计划资助项目(2006AA04Z234)

## 1 蚁群算法的基本原理

基本蚁群算法的数学模型描述如下:设  $b_i(t)$  为  $t$  时刻位于元素  $i$  的蚂蚁数目,  $\tau_{ij}(t)$  为  $t$  时刻路径  $(i, j)$  上的信息素量,  $n$  为访问节点个数,  $m$  为蚁群中蚂蚁的总数目, 则有

$$m = \sum_{i=1}^n b_i(t)$$

设  $\Gamma = \{\tau_{ij}(t) | c_i, c_j \in C\}$  是  $t$  时刻所有访问节点构成的全集  $C$  中任意节点  $c_i, c_j$  之间路径  $l_{ij}$  上残留信息素量的集合。在初始时刻各条路径上信息素量相等, 并设  $\tau_{ij}(0)$  为常量, 基本蚁群算法的寻优是通过有向图  $g(C, L, \Gamma)$  实现的,  $L$  为节点连接矩阵。

蚂蚁  $k(k = 1, 2, \dots, m)$  在运动过程中, 根据各条路径上的信息素量决定其转移方向。这里用禁忌表  $t_k$  来记录蚂蚁  $k$  当前所走过的节点集合, 集合随着  $t_k$  变化做动态调整。在搜索过程中, 蚂蚁根据各条路径上的信息素量及路径的启发信息来计算状态转移概率。 $t$  时刻蚂蚁  $k$  由节点  $i$  转移到节点  $j$  的状态转移概率为

$$P_{ij}^{(k)}(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{j \in a_k} [\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta} & j \in a \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

式中,  $a_k$  为蚂蚁  $k$  下一步允许选择的节点集合,  $a_k = C \setminus t_k$ ;  $\alpha$  为信息素启发式因子;  $\beta$  为期望启发式因子;  $\eta_{ij}(t)$  为启发函数,  $\eta_{ij}(t) = 1/d_{ij}$ ;  $d_{ij}$  为相邻两个节点之间的距离。

为了避免残留信息素过多引起残留信息淹没启发信息, 在每只蚂蚁走完一步或者完成对所有  $n$  个节点的遍历(即一个循环结束)后, 要对残留信息进行更新处理。由此,  $t+n$  时刻在路径  $(i, j)$  上的信息素量可按如下规则进行调整:

$$\tau_{ij}(t+n) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t, t+n)$$

$$\Delta\tau_{ij}(t, t+n) = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^{(k)}(t, t+n)$$

其中,  $\rho$  为信息素挥发系数,  $1-\rho$  为信息素残留因子, 为了防止信息的无限积累, 将  $\rho$  的取值范围定为  $[0, 1]$ ;  $\Delta\tau_{ij}(t, t+n)$  表示本次循环中路径  $(i, j)$  上的信息素增量, 初始时刻  $\Delta\tau_{ij}(t, t+n) = 0$ ;  $\Delta\tau_{ij}^{(k)}(t, t+n)$  表示第  $k$  只蚂蚁在本次循环中留在路径  $(i, j)$  上的信息素量。信息素的更新算法模型有多种, 其中 Ant - Cycle 模型强调算法的整体性, 在求解 TSP 问题时性能较好, 即

$$\Delta\tau_{ij}^{(k)}(t, t+n) = \begin{cases} Q/L_k & \text{第 } k \text{ 只蚂蚁在本次循环中经过 } (i, j) \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

式中,  $Q$  为信息素强度, 它在一定程度上影响算法的收敛速度;  $L_k$  为第  $k$  只蚂蚁在本次循环中所走路程的总长度。

## 2 基于蚁群算法的完全遍历路径规划

本文的环境地图采用几何表示法表示, 即用点、线及其组合来表示环境中的特征, 并用参数来表明各个特征在环境中的具体位置。几何表示法的特点是对特征的表示简洁高效, 利于路径的规划和地图的维护, 而且这种表述法比较直观, 有利于地图的人工构造并输入到机器人的先验地图库中, 尤其适用于结构化的室内环境。

Boustrophedon 单元分解法是将一根平行于绝对坐标  $Y$  轴的虚拟扫描线从地图的左边扫描至右边, 通过判断扫描线的连通性变化来生成遍历区。如图 1 所示, 扫描线从图 1 的左边开始扫描, 首先产生图中的遍历区 1, 当扫描线经过障碍物 I 时, 连通性发生变化, 产生遍历区 2 和 3。将地图进行 Boustrophedon 单元分解后, 地图将由若干障碍区和若干遍历区组成。电子地图则表示为各个区域信息的集合, 而其中单个区域的信息包括区域的属性(障碍区属性或遍历区属性)及区域顶点的坐标。通过 Boustrophedon 单元分解, 环境可以分解为如图 1 所示的若干遍历区和障碍区。由于遍历区的形状具有必有两条边平行且这两条边是相邻区域的公共边的特点, 因此可以通过判断是否到达某一公共边来判断是否到达一个区域, 通过判断是否到达另一公共边来判断是否遍历完一个区域, 在区域内可以通过往复运动实现遍历。在实现单个区域的遍历基础上, 只需确定区域的遍历顺序就可以达到完全遍历环境的目的。

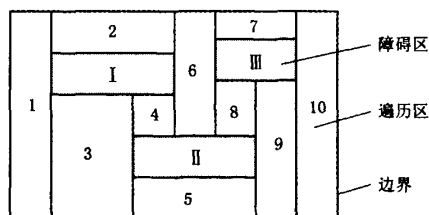


图1 基于 Boustrophedon 单元分解的环境分解图

图 2 是图 1 单元分解后的结构图, 一般情况下按照图 2 中的连接关系实施遍历算法都是不现实的, 尤其是蚁群算法要求将已经访问过的区域加入到访问过的地点禁忌表中。本文针对这种情况, 利用图 1 中的各个区域的连通关系、区域之间的距离关系、区域之间的障碍物情况, 对区域之间的距离重新定义, 并将现有的区域连接关系做进一步的补充, 形成一张完全连通图。由汉密尔顿通路的定义知道, 图 2 所示的结构图满足形成汉

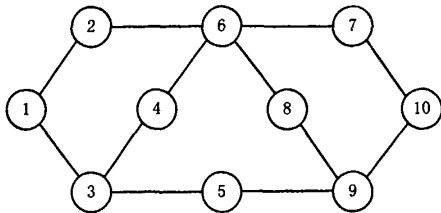


图2 基于单元分解的环境结构图

密尔顿通路的充分条件,因此必定存在一条经过各个区域一次且仅有一次的通路。

如图1所示,区域2和区域5之间的连通距离是不方便求解的,本文通过定义一个距离来表示两者之间的实际距离。虽然这个距离与实际距离之间有一定的差距,但距离值的大小趋势是一致的,而且距离的定义主要考虑了两个区域之间的直线距离、区域之间的连通关系、区域之间的障碍物情况。对于两两毗邻的区域,其距离实际值为0,但蚁群算法中需要通过对这个距离值求倒数来作为路径选择的启发函数,所以我们需要将这个值取为一个大于0的值,但是一个区域的毗邻区域是其最优选择区域,因此又不能将这个距离值定得太大,此处将毗邻区域的距离值定为 $a$ ,并通过仿真来调整这个值的大小以确定一个比较好的值。

对于非毗邻关系的区域之间的距离,我们用 $D' = bDJN'$ 来表示。其中, $b$ 是一个可调系数,可以通过仿真来调整该值以得到一个较好的数值; $D$ 为环境中两个区域之间的直线距离矩阵,在Boustrophedon的单元分解法中,两个区域的直线距离定义为两个区域的最近顶点之间的距离; $J$ 为两个区域之间的连通关系矩阵,若毗邻区域是一次连通的,则其值取1,而图1中的区域2和区域5是三次连通的,即 $j_{25} = 3$ ; $N$ 表示两个区域之间障碍物的个数矩阵, $N'$ 是将 $N$ 的非对角线元素加1所得。对于该表达式中的各个参数, $D$ 、 $N$ 可以根据划分后的区域的边界信息来确定,而 $J$ 需要通过下面的算法实现。

由图2我们可以得到矩阵 $A$ :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$a_{ij} = 1$ 表示遍历子区域 $i$ 和 $j$ 毗邻, $a_{ij} = 0$ 表示不毗邻。矩阵 $A$ 为对称矩阵,其对角线的元素值为0,即不存在通过一次连通的路径连通区域1与它自身。 $a_{ij} = 1$ 表示存在一条从区域 $i$ 到区域 $j$ 的一次连通路,如 $a_{12} = 1$ ,从图2看出,区域1、2存在一次连通路。那么如何得到非一次连通的区域之间的连通关系呢?我们可以通过求矩阵 $A$ 的 $n$ 次幂来得到两个区域之间的 $n$ 次连通关系。对于 $i, j, k$ 三个区域,如果区域 $i$ 和区域 $j$ 连通,区域 $j$ 和区域 $k$ 连通,则区域 $i$ 和区域 $k$ 连通,即当元素 $a_{ij}$ 为非零值, $a_{jk}$ 也为非零值,则通过计算

$$a_{ik} = \sum_{j=1}^{10} a_{ij} a_{jk}$$

得到区域 $i$ 和 $k$ 的有几条连通路。根据图2的连通关系知道,最多通过四次连通便可以连通该环境内任意两个区域。对图2的连通矩阵 $A$ 求 $A^2$ 、 $A^3$ 、 $A^4$ ,其中 $A$ 、 $A^2$ 、 $A^3$ 、 $A^4$ 中元素 $a_{ij}^{(n)} \neq 0$ 表明 $i, j$ 两节点存在 $n$ 次连通路,因此可以得到连通关系矩阵 $J$ ,其中, $j_{ij} = \begin{cases} 0 & i = j \\ n & a_{ij}^{(n)} \neq 0 \end{cases}$ 。图2中各区域之间的连通关系矩阵如下:

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 2 & 2 & 2 & 3 & 3 & 3 & 4 \\ 1 & 0 & 2 & 2 & 2 & 1 & 2 & 2 & 3 & 3 \\ 1 & 2 & 0 & 1 & 1 & 2 & 3 & 3 & 2 & 3 \\ 2 & 2 & 1 & 0 & 2 & 1 & 2 & 2 & 3 & 3 \\ 2 & 3 & 1 & 2 & 0 & 3 & 3 & 2 & 1 & 2 \\ 2 & 1 & 2 & 1 & 3 & 0 & 1 & 1 & 2 & 2 \\ 3 & 2 & 3 & 2 & 3 & 1 & 0 & 2 & 2 & 1 \\ 3 & 2 & 3 & 2 & 2 & 1 & 2 & 0 & 1 & 2 \\ 3 & 3 & 2 & 3 & 1 & 2 & 2 & 1 & 0 & 1 \\ 4 & 3 & 3 & 3 & 2 & 2 & 1 & 2 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

在电子地图中两个遍历子区域的最近顶点分别为 $A(x_i, y_i)$ 、 $B(x_j, y_j)$ ,判断两者之间的障碍物个数就是判断 $AB$ 连线通过的障碍物个数。将顶点 $A(x_i, y_i)$ 指向 $B(x_j, y_j)$ 构成一个向量 $\overrightarrow{AB}$ ,设障碍物的顶点集合为 $O = \{V_i | V_i \text{ 为障碍物的顶点}\}$ ,判断某个障碍物是否在顶点 $A, B$ 之间可以通过判断障碍物顶点在向量 $\overrightarrow{AB}$ 顺时针及逆时针方向的分布来实现。障碍物顶点在向量 $\overrightarrow{AB}$ 的顺时针方向还是在逆时针方向可以通过向量的叉乘来判断,即

$$C_i = \overrightarrow{AB} \times \overrightarrow{AV_i}$$

向量 $\overrightarrow{AV_i}$ 是顶点 $A$ 和障碍物顶点 $V_i$ 组成的向量。如果集合 $\{C_i\}$ 中既存在正数也存在负数,表明该障碍物在两个遍历子区域之间。例如,图1的电子地图中遍历子区域之间的障碍物数矩阵 $N$ 如下:

$$N = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 1 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

为了只保留对角线元素为0,将矩阵 $N$ 的非对角线元素加1,得到规格化后的障碍物矩阵 $N'$ 。

距离矩阵 $D$ 表示遍历子区域之间的实际距离,其元素 $d_{ij}$ 为子区域 $i$ 和 $j$ 的最近顶点之间的距离,对于毗邻区域的距离值定为 $a$ ,非毗邻区域的距离值由电子地图根据区域坐标定出。图1区域之间距离矩阵 $D$ 实测如下:

$$D = \begin{bmatrix} 0 & a & a & 28.3 & 20 & 30 & 40 & 44.7 & 50 & 60 \\ a & 0 & 10 & 10 & 31.6 & a & 10 & 11.2 & 20.6 & 40 \\ a & 10 & 0 & a & a & 10 & 25 & 20.6 & 33.5 & 50 \\ 28.3 & 10 & a & 0 & 10 & a & 18 & 10 & 20 & 44.7 \\ 20 & 31.6 & a & 10 & 0 & 14.1 & 36.4 & 10 & a & 20 \\ 30 & a & 10 & a & 14.1 & 0 & a & a & 10 & 30 \\ 40 & 10 & 25 & 18 & 36.4 & a & 0 & 10 & 10 & a \\ 44.7 & 11.2 & 20.6 & 10 & 10 & a & 10 & 0 & a & 25 \\ 50 & 20.6 & 33.5 & 20 & a & 10 & 10 & a & 0 & a \\ 60 & 40 & 50 & 44.7 & 20 & 30 & a & 25 & a & 0 \end{bmatrix}$$

通过对障碍物矩阵、距离矩阵、连通矩阵的相同位置的元素相乘,再对非一次连通的区域距离乘以系数 $b$ ,得到一个重新定义的综合距离矩阵 $D'$ ,其中

$$d'_{ij} = \begin{cases} 0 & i = j \\ d_{ij}j_{ij}n'_{ij} & i \neq j, j_{ij} \leq 1 \\ d_{ij}j_{ij}n'_{ij}b & i \neq j, j_{ij} > 1 \end{cases}$$

图1区域综合距离矩阵 $D'$ 如下:

$$D' = \begin{bmatrix} 0 & a & a & 56.6b & 40b & 60b & 120b & 268.2b & 150b & 240b \\ a & 0 & 20b & 20b & 189.6b & a & 20b & 22.4b & 123.6b & 120b \\ a & 20b & 0 & a & a & 20b & 150b & 123.6b & 67b & 150b \\ 56.6b & 20b & a & 0 & 20b & a & 36b & 20b & 60b & 268.2b \\ 40b & 189.6b & a & 20b & 0 & 84.6b & 327.6b & 20b & a & 40b \\ 60b & a & 20b & a & 84.6b & 0 & a & a & 20b & 60b \\ 120b & 20b & 225b & 36b & 327.6b & a & 0 & 20b & 20b & a \\ 268.2b & 22.4b & 61.8b & 20b & 20b & a & 20b & 0 & a & 100b \\ 150b & 123.6b & 67b & 60b & a & 20b & 20b & a & 0 & a \\ 240b & 120b & 150b & 268.2b & 40b & 60b & a & 100b & a & 0 \end{bmatrix}$$

### 3 求解实例与仿真

对图3所示的环境地图运用蚁群算法进行仿真,结果如表1所示。影响优化的区域遍历顺序的因子包括蚁群算法中信息素启发式因子 $\alpha$ 、期望启发式因子 $\beta$ 、信息素挥发因子 $\rho$ 、信息素强度因子 $Q$ 及距离因子 $a$ 和 $b$ 。 $\alpha$ 值越大,则后续蚂蚁更倾向于选择前面蚂蚁经过的较优路径,这样就增强了蚂蚁之间的协作,但也降低了搜索的随机性,当

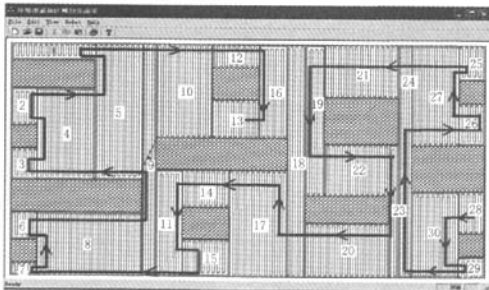


图3 环境遍历仿真实例

表1 不同的 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\rho$ 值对应的最优解和循环次数

$\alpha$	遍历距离 最优解	循环 次数	$\beta$	遍历距离 最优解	循环 次数	$Q$	遍历距离 最优解	循环 次数	$\rho$	遍历距离 最优解	循环 次数
0.5	2556.3	494	0.5	2075.4	230	100	1996.0	145	0.1	1996.0	66
1.0	2075.4	230	1.5	2015.5	127	200	1936.1	137	0.2	1996.0	38
1.5	2122.1	131	2.5	2000.8	119	300	1996.0	28	0.3	1996.0	59
2.0	2182.3	42	3.5	2115.3	59	400	1936.1	30	0.4	1936.1	20
2.5	2887.1	46	4.5	1996.0	80	500	1996.0	95	0.5	2071.3	58
3.0	2984.5	34	5.0	1996.0	47	600	2010.2	152	0.6	2054.2	23
4.0	2610.8	21	5.5	2006.8	21	700	1996.0	210	0.7	2071.3	25
5.0	2505.0	20	6.0	1996.0	79	800	2054.2	53			
6.0	2892.2	23	6.5	1996.0	80	900	1996.0	226			
7.0	3265.3	15	7.0	1996.0	79	1000	2015.5	64			
						2000	2071.3	379			

$\alpha$ 过小时,易使得搜索可能停留在局部最优解; $\beta$ 反映了先验性和确定性因素在搜索过程中的重要程度,其值过大时,算法的收敛速度加快,但随机性减弱,易于陷入局部最优解; $Q$ 越大,算法的收敛速度越快,当 $Q$ 值小于1000时,这种规律不是很明显,当 $Q$ 特别大时,算法的全局搜索能力变差,算法性能变得很不稳定; $\rho$ 是影响路径上信息素量的参数,当 $\rho$ 过大时,

蚂蚁在已走路径上所能残留的信息素减少,使得路径的搜索很无序; $a$  值越大,算法易陷入局部最优解; $b$  的作用则和  $a$  相反。

通过细化各个参数的调整步长,优化各种参数的组合,得到一组最理想的参数为  $\alpha=1, \beta=2, Q=400, \rho=0.4, a=0.4, b=2$ , 得到优化的区域遍历顺序为 28-30-29-24-27-26-25-21-19-22-23-20-18-17-14-11-15-9-8-7-6-3-4-2-1-5-10-12-16-13, 遍历面积百分率达到 95% 以上, 遍历重叠率在忽略机器人尺寸影响下小于 10%。

#### 4 结论

本文根据遍历环境内区域关系和区域连通图, 将已有的连通图补充为完全连通图, 并根据区域信息和连通信息定义一个区域之间的距离矩阵, 赋予区域之间的连接权值。根据距离矩阵, 采用蚁群算法对区域的遍历顺序进行优化。仿真研究表明, 该方法用于不确定环境下的移动机器人遍历路径规划, 不但能保证遍历所有可达工作空间, 并且规划的路径较短、路径重复率小, 具有较高的规划效率。

#### 参考文献:

- [1] 李磊, 叶涛, 谭民, 等. 移动机器人技术研究现状与未来[J]. 机器人, 2002, 24(5): 475-480.
- [2] 李开生, 张慧慧, 费仁元, 等. 具有遍历特性的移动机器人规划方法的研究[J]. 机器人, 2001, 23(6): 486-492.
- [3] de Carvalho R N D, Vidal H A, Vieira P, et al. Complete Coverage Path Planning and Guidance for Cleaning Robots[C]//Proc. of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Guimarães: IEEE, 1997: 677-682.
- [4] Acar E U, Choset H. Robust Sensor-based Coverage of Unstructured Environments[C]//Proceedings of the 2001 IEEE/RSJ on Intelligent Robots and Systems. Maui: IEEE, 2001: 61-68.
- [5] Zheng Xiaoming, Sven Koenig. Robot Coverage of Terrain with Non-uniform Traversability[C]//2007 IROS IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. San Diego: IEEE/RSJ, 2007: 3757-3764.
- [6] Hazon N, Kaminka G A. Redundancy Efficiency and Robustness in Multi-robot Coverage[C]//Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Barcelona: IEEE, 2005: 735-741.
- [7] Correll N, Martinoli A. Robust Distributed Coverage

Using a Swarm of Miniature Robots[C]//2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Roma: IEEE, 2007: 379-384.

- [8] Choset H, Lee J Y. Sensor-based Construction of Retract-like Structure for a Planar Rod Robot[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2001, 17(4): 435-449.
- [9] Dorigo M, Birattari M, Stutzle T. Ant Colony Optimization Artificial Ants As a Computational Intelligence Technique[J]. IEEE Computational Intelligence Magazine, 2006, 4(1): 28-39.
- [10] Jackson D E, Holcombe M, Ratnieks F L W. Trail Geometry Gives Polarity to Ant Foraging Networks[J]. Nature, 2004, 7019(432): 907-909.

(编辑 张 洋)

作者简介: 张赤斌, 男, 1968 年生。东南大学机械工程学院副教授。研究方向为机电控制及自动化、智能控制。发表论文 18 篇。  
王兴松, 男, 1965 年生。东南大学机械工程学院教授。

#### 中国机械工程学会九届二次常务理事(扩大)会议

于 2008 年 7 月 18 日在兰州召开, 中国机械工程学会九届常务理事, 西北地区理事, 西北地区各省区市机械工程学会秘书长, 出席兰州年会的各专业分会主任委员、副主任委员共 70 余人出席了会议。会议由宋天虎常务副理事长主持, 张彦敏秘书长作了工作汇报, 路甬祥理事长作了会议总结。

张彦敏秘书长的工作汇报回顾了 2007 年 6 月 3 日在北京召开的九届一次常务理事(扩大)会议以来, 我会系统举办的一系列重要活动, 整理传达了路甬祥理事长去年以来对学会工作的一系列重要意见要点, 并提出了把学会工作推进到新水平的三项行动计划, 即促进自主创新行动计划、推动绿色制造行动计划和加强人才培养行动计划。

与会代表认真讨论了张彦敏秘书长作的工作汇报, 大家认为: 我会经过 70 多年、几代人的努力, 已成为具有相当影响力的全国学会, 在全面落实科学发展观、振兴装备制造业、努力实现我国从制造大国向制造强国迈进的征程上, 我会应该作出更大的贡献, “三项行动计划”抓住了我国制造业发展中的关键, 可以作为我会工作的重要平台。

最后, 路甬祥理事长作了总结发言。路甬祥理事长在总结中指出: 学会工作的重点必须要适时地调整, 要加大对企业、行业和制造产业集聚地区的工作力度, 特别要在重要行业、制造产业集聚的地区, 选择一些优势企业、优势企业集群, 扎实地推进产学研结合, 把学会的信息优势、人才优势, 聚焦到企业技术进步上来, 把我们的学术交流、技术研讨、国际合作、技术咨询、人才培养等工作, 引导聚焦到推动企业技术进步上来, 把学术活动、展览活动、技术推广、项目对接、成果转化等活动, 与区域产业紧密地结合起来, 着力提升我国制造产业的核心竞争力, 促进创建自主品牌, 推动区域制造产业的发展。

(工作总部)