基于劳动分工的群机器人地图创建探索策略研究*

阎 静，曾建潮，张国有
（太原科技大学 计算机科学与技术学院 复杂系统与计算智能实验室，太原 030024）

摘 要： 受社会性昆虫劳动分工的启发提出一种群机器人地图创建的探索策略，以提高群机器人创建地图的效率。当机器人所在顶点位置有未访问的路径时，机器人随机选择一条未访问路径进行访问；如果当前位置的所有路径都已被访问，机器人会根据响应函数对下一访问位置进行概率选择。对算法分别进行了不同地图规模和机器人数量的计算机仿真实验，根据算法评价指标（覆盖时间、路径重复覆盖次数和覆盖率）对实验结果进行了评价，并与随机选择的算法进行了对比，结果表明算法是可行、有效的。最后指出了下一步研究的方向。

关键词： 群机器人；地图创建；劳动分工模型；探索策略
中图分类号： TP391 **文献标志码：** A **文章编号：** 1001-3695(2013)01-0094-05
doi：10.3969/j.issn.1001-3695.2013.01.022

Research on exploration strategy in map building of swarm robotics based on model of division of labor

YAN Jing, ZENG Jian-chao, ZHANG Guo-you
(*Complex System & Computational Intelligence Laboratory, Institute of Computer Science & Technology, Taiyuan University of Science & Technology, Taiyuan* 030024, *China*)

Abstract: Inspiring of division labor of the social insect, this paper proposed an exploration strategy of mapping in swarm robotics to improve the map building efficiency of swarm robot. When the robot found the paths not visited on vertex position, it would randomly chose an unvisited path to access. If all the paths of the current location had been visited, it designed the response function of algorithm in terms of the model of division labor and robots selected the next position according to the given probability. The simulation experiment set up various numbers of vertexes in map and the numbers of robots according to the evaluation metrics which included total coverage time, path repeat coverage time, rate of coverage and so on. This paper evaluated and compared the experimental results with random selection algorithm. The results show that the algorithm is efficient. At last, it put forward the further research.

Key words: swarm robots; map building; model of division labor; exploration strategy

0 引言

地图创建是移动机器人研究领域中的基本问题，是移动机器人实现自主导航和其他智能活动的关键和基础[1]。机器人建立地图的问题通常被称为 CML（concurrent mapping and localization）或 SLAM（simultaneous localization and map building）问题，即并发定位与建图[2]，而在 SLAM 领域中研究的关键问题包括地图的表示方法、不确定信息的处理方法、数据的关联、自定位和探索规划[3]。相对于 SLAM 中其他问题，对群机器人地图创建中探索规划问题的研究较少，而机器人的探索策略问题是一个挑战性的规划难题[4]。地图创建的探索策略在现实中有着广泛的应用前景，当环境的变化使原有地图不能准确地反映实际环境信息，如地震使原有的交通道路被阻断、透水事故造成井下巷道坍塌等，这时快速地获取受灾区域的地图，就可为灾难搜救提供最新的环境信息，为救援决策提供帮助。采用群机器人进行灾难时的地图遍历和创建，由于其鲁棒性、灵活性和规模可伸缩性，使之成为可行的解决办法。目前提出的适用于群机器人的探索策略有以下几种。仿照生物嗅觉气味的按特定的方向对未知环境进行探测，如 Hayes 等人[5]提出群机器人气味定位法等，但是这种方法只适合一些特殊的环境；Yamauchi[6]提出了基于边界的探测方法，其基本思想是让机器人向已知区域和未知区域的边界运动，从而获得更多的未知环境信息，但这种算法容易造成多个机器人向同一目标边界运动，从而造成拥挤。还有人提出了以市场规则为基础的多机器人探索策略，如 Zlot 等人[7]提出的通过计算机器人到目标位置的花费来决定机器人探测方向而使得成本最小，这种方法可用于群机器人地图探测，且鲁棒性较好，计算简单，但其访问方法只考虑了距离因素，影响了访问的效率。本文提出了一种基于劳动分工模型的地图创建探索策略，目的是使群体机器人共同遵守一种简单的探索策略，在这种策略的指导下机器人无须集中控制，而采用分散控制方式就可以高效地完成地图创建，这种探索策略具有规模可伸缩性和灵活性。

收稿日期：2012-04-30；修回日期：2012-06-29 基金项目：国家自然科学基金资助项目（60975074）；山西省自然科学基金资助项目（2009011017-1）；山西高校科技研究开发资助项目（20091130）；太原科技大学博士启动基金资助项目（20102011）

作者简介：阎静（1977-），男，硕士研究生，主要研究方向为群体智能、群机器人（yj01939@sohu.com）.

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1　问题定义和算法前提条件

本文要解决的问题是实现群机器人对封闭二维空间内环境地图的遍历。个体机器人具有有限的感知能力,能感知其当前的位置,并识别当前位置通往其他位置的路径; 机器人可通过感知获取和存储局部地图,并在局部地图中设置已访问标志点,将标志点及其连接路径保存于本地地图中; 机器人能够与其他机器人进行通信,发送自身位置信息及本地地图信息,并可同时接收其他机器人的位置及局部地图信息; 同时机器人可以在某一标志点或某一路径上移动。

本文探索策略提出的基础是机器人利用标志法进行定位,如 Wang 等人[8] 提出的地图创建方法。标志法是指机器人通过对所访问的顶点和边做出可以识别的标志,来判断顶点和边是否被访问过,通过对标志的识别和区分达到地图创建的目的。本文算法所使用的地图表示方法是拓扑地图,主要是因为用拓扑地图来描述环境中的关键路标及其之间的联系,具有全局连贯性好、鲁棒性强的特点,特别适合对大而简单、可提取大量高级特征的结构化环境进行描述[9] ,如在前文提到的井下救灾。在拓扑地图中存储一个顶点对应于环境中的一个特定的地点,顶点间的弧线表示两个顶点对应的地点是相通的。在此假定机器人可以有足够的空间存储地图。

利用本文提出算法进行群机器人地图创建,机器人需要具备以下功能:

a) 感知能力。机器人能够感知待探测环境的顶点和顶点相邻的路径。

b) 移动能力。机器人能够由一个顶点移动到另一顶点。

c) 标志能力。机器人能够对顶点和顶点相邻的路径进行标志,并且这个标志是唯一的。这要求机器人能对路径进行两种标志: (a) 临时标志(当机器人完成了对当前顶点的标志,还不知道路径另一端是否被标志时对路径所做标志) ; (b) 正式标志(当机器人探知路径两边的端点都被标志时对路径所做标志) 。

d) 标志识别能力。机器人能对自己和其他机器人所做的标志进行识别。

e) 标志更改能力。机器人能将临时标志改为正式标志。

f) 全局通信能力。当机器人将新的顶点或边加入所创建的地图或集合 E(用来存放机器人探索到的边) 中时,会通知所有的其他机器人进行数据更新; 同时机器人也具备接收相应信息的能力。

g) 冲突检测能力。当机器人在移动或通信过程中发生冲突,能够自动采取措施避免冲突发生。

h) 简单运算能力。机器人能根据相邻顶点的已访问路径和未访问路径,按本文提出的劳动分工算法进行简单运算,计算出下一待访问顶点位置。

单个机器人所要维护的信息包括:

a) 有限的无向图 $\mathrm{mat} = (V, L)$ 。机器人最终创建是一个有限的无向图 $\mathrm{mat} = (V, L)$,其中 V 是无向图中顶点的集合 $V = \{v_1, v_2, \cdots, v_n\}$,L 是无向图中边的集合 $L = \{(v_1, v_2), (v_2, v_1), \cdots\}$ 。机器人所创建的地图没有边长和方向等其他信息,顶点之间的边只反映了顶点之间有路径相连。

b) 相邻边集合 E。机器人对所在顶点的边进行探测时会对边进行标志,这个标志是唯一且可以被所有的机器人所识别的。开始是临时标志,当边的两端顶点被添加到所创建的地图后,将临时标志改为由顶点标志命名的正式标志。

c) 相邻顶点权值信息数组 weight。机器人对当前顶点的相邻顶点应用响应函数算法计算权值以后,权值保存在数组 weight 中,供算法进行概率选择。

2　劳动分工模型

自然界中一些社会性昆虫,如黄蜂、蚂蚁在完成哺育幼虫、外出觅食、抵御外敌等多个任务时,会自动调节资源分配和参与这些任务的数量[10] 。哺育幼虫的工蜂和工蚁倾向于移向幼虫饥饿信号较强的区域; 食物较少时个体将外出觅食; 当外敌入侵信号较强时,更多的个体将加入到抵御外敌的任务中。这一现象可用劳动分工模型解释和说明,个体对不同任务都有一个响应阈值[11] ,当任务的刺激强度超过个体的响应阈值越大时,个体参与执行这个任务的概率就越大,相反,当任务的刺激强度低于个体的响应阈值时,个体参与该任务的概率就会变小[12] 。群机器人系统是特殊的多机器人系统,由许多无差别的自治机器人组成,具有典型的分布式系统特征[13] 。受此启发,在群机器人地图遍历的过程中,机器人根据劳动分工模型选择路径,完成地图的遍历和更新,个体在顶点所连接的路径都已访问的情况下,根据已创建的地图,得出邻近标志点的未访问路径数量,计算响应函数值并确定其移动方向。基于劳动分工模型的响应函数为

$$T(v_k) = \frac{(u_k + \alpha c_k)}{\sum_{j=1}^{m} (u_j + \alpha c_j)} \tag{1}$$

其中: u_k 为与路径 k 相连标志点的未访问路径数量; c_k 为与路径 k 相连标志点处的已访问路径数量; $\alpha(0 < \alpha < 1)$ 为调节因子; 参数 k 代表与当前顶点相连的不同路径; 参数 v 代表不同的与当前位置相邻的标志点; m 代表和当前顶点相邻的顶点的个数。机器人对每个相邻顶点计算响应函数,以响应函数值为概率,对所有相邻顶点进行概率选择,选出的相邻顶点作为机器人下一次访问的新顶点。该方法使得机器人主动趋向访问连接未访问路径较多的顶点,从而达到有效探索地图的目的。

3　基于劳动分工模型的群机器人地图创建探索策略

本算法为机器人设定了六种状态: 顶点识别状态(recognitionState) 、顶点信息标志状态(markState) 、地图信息添加状态(mapAdditionState) 、搜索状态(researchState) 、选点状态(selectState) 和移动状态(moveState) 。其中顶点识别状态是机器人对新到达的顶点进行判断,辨别该顶点是否被访问过; 顶点信息标志状态是机器人对未访问顶点及其路径进行标志的状态; 地图信息添加状态是机器人对访问到的顶点或边进行记录的状态; 搜索状态是机器人寻找临时命名边的状态; 选点状态是机器人调用选点算法计算下一移动目标的状态; 移动状态是机器人的运动状态。机器人状态转换如图 1 所示。

由图 1 可以看出,除移动状态外,机器人的其他五种状态的转换是围绕机器人对顶点和边的标志进行识别、标记、获取、查找和比较来完成的。在算法中为了判断机器人是否完成了地图的创建工作,设定了一个集合 E 来保存机器人在顶点信息获取状态时探测到的与当前顶点相邻的边,称为顶点相邻边集合 E。集合 E 中的元素包含有机器人临时做出标志的边和

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

临时边更名后的正式边。机器人由随机顶点开始创建地图，首先进入顶点识别状态。如果此顶点已被访问过，机器人则进入地图信息添加状态，按顶点标志对此次访问边（指机器人由出发的顶点到现在顶点的边）进行正式标志，正式标志的边会被加入到集合 L 中，同时更新集合 E 中相应的临时边为正式边，完成后通知其他机器人更新相关信息，机器人进入搜索状态；如果此时顶点未被访问过，机器人进入顶点信息标志状态，对该顶点进行标志，并且机器人要对该顶点的边做临时标志，并将临时标志边加入到集合 E 中，所有路径都做好标志后，机器人进入地图信息添加状态，按顶点标志对此次访问边（指机器人由出发的顶点到现在顶点的边）进行正式标志，正式标志的边会被加入到集合 L 中，同时更新集合 E 中相应的临时边为正式边，并通知其他机器人更新相关信息，随后机器人进入搜索状态。在搜索状态，机器人会查找临时边来进行下一步遍历，如果找到临时边，机器人进入移动状态；如果没有找到临时边，机器人会判断已遍历边集合 L 和顶点相邻边集合 E 是否相等。如果已遍历边集合 L 等于顶点相邻边集合 E 时，机器人地图创建任务完成，算法结束；如果顶点的所有路径都被访问过了，而此时集合 L 不等于集合 E，机器人进入选点状态，在选点状态调用上文提到的基于劳动分工模型的算法进行选点，选定新顶点后，机器人进入移动状态。机器人在移动状态按选定的路径进行移动，当机器人到达新顶点后进入顶点识别状态。以上过程直到集合 L 等于集合 E 时结束，此时地图创建完成。

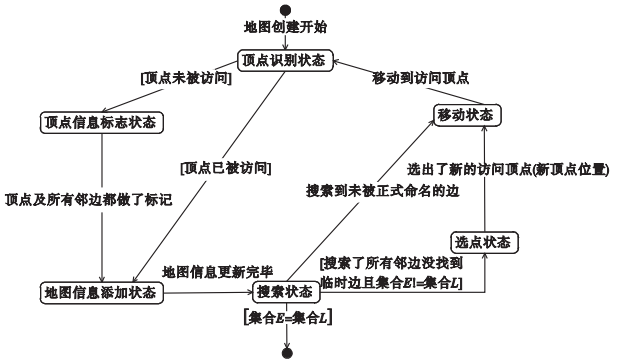

图1 群机器人地图遍历状态转换

群机器人地图创建算法流程如下：

算法 1 群机器人探测未知环境策略

输入：机器人的数量及开始位置。

输出：模拟现实拓扑地图的同构表示。

```
initialize:
V←∅; //顶点集合初始化
L←∅; //已遍历边集合 L 初始化
E←∅; //顶点邻接边集合 E 初始化
sum←0; //时间步初始化
state←recognitionState; //机器人初始状态为顶点识别状态
recognize( nowVertex) ; //机器人对当前顶点进行识别
find( tempEdge) ; //机器人寻找临时边
broadcast( update) ; //通知其他机器人更新相关信息
begin
visit←iRecognize( nowVertex) ;
//机器人识别当前顶点是否被访问过
if( visit! = true) { //当前顶点未被访问过
  iState←markState;
mark( vertex) ; //在顶点做标记
E←tempMark( edges) ; //该顶点相邻边做临时标记后加入 E
iState←mapAdditionState;
V←mark( vertex) ;
broadcast( mark( vertex) ) ; //通知其他机器人更新相关信息
iState←researchState;
if( find( tempEdge) = = true) { //机器人找到了临时边
  road←find( tempEdge) ;
  iState←moveState; //机器人移动到新访问顶点
  sum←sum + 1; }
}
while( E! = L) {
  iState←recognitionState; /* 机器人 i 到达顶点后进入顶点识别状态* /
  visit←iRecognize( nowVertex) ;
  if( visit! = true) { //如果当前顶点未被访问过
    iState←markState;
    mark( vertex) ; //将顶点标记
    E←tempMark( otheredges) ; /* 该顶点的其他邻边做临时标记后加入 E 中* /
    iState←mapAdditionState;
    mat( V,L) ←( Mark( vertex) ,v1 v2) ;
    E←change( v1 v2) ; /* 将集合 E 中对应的临时命名边改为正式边* /
    broadcast( mark( vertex) ,v1 v2) ;
    iState←researchState;
    if( find( tempEdge) = = true) {
  road←find( tempEdge) ;
  iState←moveState; //机器人移动到新访问顶点
  sum←sum + 1; }
  } else{ //如果当前顶点已被访问
    iState←mapAdditionState;
    L←v1 v2; //将此次遍历路径加入已遍历边集合 L
    E←change( v1 v2) ; /* 将集合 E 中对应的临时命名边改为正式边* /
    broadcast( v1 v2) ;
    iState←researchState;
    if( find( tempEdge) = = true) {
    road←find( tempEdge) ;
    iState←moveState;
    sum←sum + 1; } else{
    iState←selectState;
    lab( t) ;
    //lab 为选点算法，假设 t 为当前位置，返回下一访问位置
    iState←moveState;
    sum←sum + 1;
    }
  }
}
return mat;
end
```

算法 2 选点算法访问规则

输入：t;（机器人当前位置），mat(V,L)（已获得的地图信息）。

输出：nextvertex（机器人要访问的下一位置）。

```
initialize:
  checkUk( k) ; /* 计算与第 k 条路径相连的标志点处的未访问路径的数量* /
  checkCk( k) ; /* 计算与第 k 条路径相连的标志点处的已访问路
```

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

```
径的数量* /
        countNeighbour( t) ; //计算 t 顶点的相邻顶点数
        countAllUk( t) ; //计算 t 顶点的相邻顶点共有多少条未访问路径
        countAllCk( t) ; //计算 t 顶点的相邻顶点共有多少条已访问路径
    begin
        if( E! = L) {
            m←countNeighbour( t) ;
            for( k = 0; k < m; k + +) { /* 分别计算各顶点的已访问路径和
未访问路径* /
            Uk←checkUk( k) ;
            Ck←checkCk( k) ;
        }
        AllUk←countAllUk( t) ; //计算出相邻顶点的未访问路径总数
        AllCk←countAllCk( t) ; // 计算出相邻顶点的已访问路径总数
        根据响应函数式( 1) 计算各相邻顶点权值 T( Vk) ;
        weight [k] = T( Vk) ;
        按照计算出的权值进行概率选择,所选顶点作为新的待访问顶点;
        return nextvertex;
        } else{
        return t;
        }
    end
```

本策略中机器人无论处于何种状态,一旦收到其他机器人的地图信息更新消息都会立即更新所维护的地图信息,机器人所处状态不受影响。另外,本策略中地图创建完毕是指机器人工作环境中的所有探测到的顶点及顶点相关的边,都被机器人映射到了所创建的地图中。由算法 1 可知机器人向已遍历集合 L 中添加的边,添加之前一定是一条相邻边集合 E 中的临时命名边,而添加到集合 L 后,机器人会立即更新集合 E 中对应的临时边为正式边。可知,当集合 E 等人集合 L 时,两集合中的元素完全相同,此时集合 E 中不再有临时边,也就是说所探测到的边都被添加到了地图当中,即地图创建完毕。

4　仿真实验

4.1　计算机仿真及算法指标

为了验证算法的有效性,编写仿真程序对提出的算法进行实验,仿真程序用 JavaSE 语言编写,利用 Java 语言的多线程来模拟多个机器人,机器人的数量根据实验者的要求来确定。如第 1 章中所述,这里采用拓扑地图来对现实环境进行抽象模拟。理论上讲,实验中的顶点可以不受限制,但由于计算机的内存等硬件条件限制,本文实验中将最大顶点个数设置为 120 个,最多用 24 个机器人对地图进行探测。拓扑地图为无向连通图,连通路径由计算机随机产生,机器人探测的未知地图由矩阵表示,顶点之间没有通路用数字 0 表示,有通路用数字 1 表示。为保证图的连通性,矩阵一行中必须有一个元素为 1,规定每个顶点的相邻边数最多不超过 8 条。最后,机器人创建出的地图也由矩阵表示,顶点之间没有通路用数字 0 表示,有通路用非 0 数字表示。这里规定两个不同顶点之间的直接路径按一条边计算,机器人完成一次顶点之间的路径探测算一个时间步,即机器人走了一条边。

为了分析本算法创建地图的效率,使用下面的参数来评价算法:

a) 覆盖时间 = 所有机器人访问地图所用的时间步总和/机器人个数,此指标表示创建此地图,机器人所用的总代价。

b) 路径重复覆盖次数 = 覆盖时间/所创建地图的边的总数,得出的平均值称为路径重复覆盖次数,此指标表示边被机器人重复访问的次数,也可以说该指标表示机器人访问到一条边所用的时间步。

c) 地图覆盖率 = 机器人所创建地图边数/模拟实验地图的实际边数,此指标用来衡量机器人所创建地图的准确程度和完整性。

4.2　算法仿真实验

首先按照本文提出探索策略进行以下实验。实验目的是分析随着地图的顶点、边数,以及机器人数量的增加,上述指标的变化情况,以证明算法在待探测范围扩大和机器人数量增多的情况下依然有效。为使所得指标更具有可比性,设定机器人数量占待探测地图顶点数的 20%,分别对 10、20、30、40、50、60、70、80、90、100、110 和 120 个顶点的地图进行测试,机器人数量分别是 2、4、6、8、10、12、14、16、18、20、22 和 24 个,分别对不同顶点数量的同一地图都进行 20 次实验,以平均值作为实验结果,本文实验中选点算法中的调节因子都设定为 $\alpha = 0.32$,机器人随机分布在不同位置,对待探测地图进行访问,直到对待探测地图实现完全遍历,即覆盖率为 100%。实验后将对仿真实验得出的算法指标,即覆盖时间、路径重复覆盖次数和地图覆盖率进行分析。如图 2 所示,是仿真实验中一个 20 顶点的拓扑地图,共 36 条边。

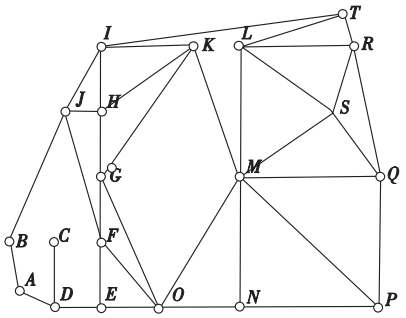

图2　群机器人地图遍历拓扑地图

实验结果列在群机器人地图创建实验结果表中,如表 1 所示,并对表中的路径重复覆盖次数用折线图来进行分析,如图 3 所示。

表 1　群机器人地图创建实验结果

顶点数(机器人数)	地图边数	20 次实验平均覆盖时间/时间步	20 次实验平均路径重复覆盖次数/时间步/边	覆盖率/%
10(2)	14	79.73	5.7	
20(4)	33	238.69	7.23	
30(6)	55	466.18	8.48	
40(8)	73	1 156.71	15.84	
50(10)	95	1 259.99	13.26	
60(12)	113	1 754.33	15.52	
70(14)	134	1 985.16	14.81	100
80(16)	152	2 957.85	19.46	
90(18)	171	2 602.96	15.22	
100(20)	190	3 624.59	19.07	
110(22)	212	5 723.03	27	
120(24)	233	4 073.49	17.48	

将实验结果表 1 中的数据 20 次实验平均重复路径覆盖值按地图顶点数和机器人数绘制成折线图,如图 3 所示。

从图 3 中可以看出,随着待探测地图的规模扩大和机器人

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

数量的增多，平均路径重复覆盖次数增长缓慢，有时甚至还有所下降，没有出现爆发性的增长。路径的重复覆盖次数也可以看做每条边的平均访问代价，路径重复覆盖次数的增长趋于平缓，这说明算法在保证全覆盖的情况下，将边的平均访问代价控制在了一定范围内。在实验的过程中，路径重复覆盖次数没有随着地图范围的扩大和机器人数量的增加出现爆发性的增长。

4.3 两种不同选点方法比较

由于本文提出的探索策略是基于拓扑地图的，与其他已有算法度量单位和研究的侧重点都有所不同例如 Zlot 等人的衡量指标为机器人在移动时的覆盖面积，即单位移动距离的平均覆盖面积; Wang 等人研究的地图创建中，机器人需在给定时间在约定地点合并地图。其与本文算法给定的条件并不相同，因此都无法和本文提出的探索策略进行比较。而本文算法的关键在于当机器人所在顶点的所有路径都被访问后，机器人对下一访问位置的选取，实验对此情况下的选点采用另一种随机选点策略。通过两种策略实验结果的对比，来说明基于劳动分工模型探索策略的有效性。算法对比采取如下方式: 利用计算机仿真程序对 60 和 120 个顶点的地图进行测试，机器人的数量分别是 12 和 24 个。测试过程中让机器人分别采用两种访问策略对地图进行遍历: a) 让机器人遵守本文提出的选点算法对地图进行遍历; b) 让机器人采取随机选点策略对地图进行遍历，即当机器人所在顶点没有未访问路径时，机器人不采取任何策略，只是随机选取一个相邻顶点作为下一访问目标。两种方法所遍历的地图结构是完全相同的，并且都要实现地图的完全访问，即覆盖率 100%，实验对每种地图都进行 20 次实验最后取平均值。由于实验测试用的地图顶点数、边数和机器人数都是完全相同的，因此只考察具有代表性的实验指标覆盖时间。实验结果如表 2 所示。

表 2 群机器人地图创建对比测试实验结果

顶点数(机器人数)/个	本文算法 20 次实验平均覆盖时间/时间步	随机选取顶点 20 次实验平均覆盖时间/时间步	覆盖率/%
60(12)	1 832.75	2 116.98	100
120(24)	4 505.28	6 828.6	

观察表 2 的结果可以发现，当群机器人使用本文提出的基于劳动分工模型的策略创建地图时，耗费的时间步低于采取随机策略所耗费的时间步，随着地图规模的扩大，群机器人采用本文策略所节省的时间步也随之增加。将表 2 绘制成对应的柱状图会更加直观，如图 4 所示。

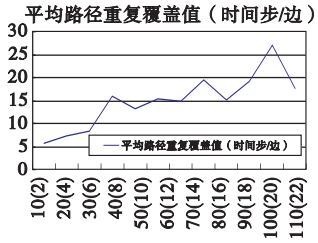

图3 群机器人地图创建实验结果

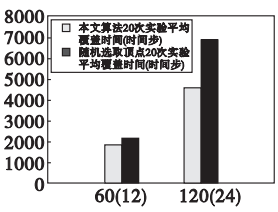

图4 群机器人地图创建对比实验测试结果

通过对比测试进一步证明了本文提出的基于劳动分工模型的探索策略在群机器人地图创建过程中的有效性。

4.4 实验结果总结

通过实验可以看出，本文提出的算法在当待探测范围扩大且机器人数量增加时仍然有效，提高了机器人在创建地图过程中的目的性。特别是当机器人面对当前顶点的所有路径都被访问时，应用本文的选点算法使机器人对下一访问顶点选取更具有目的性，机器人访问有未访问路径顶点的概率大大增加，即尽可能地让机器人所走的每一步都对未知环境的探测作出了贡献，所有的机器人都遵守这一算法要求，使得群机器人在地图创建的过程中整体表现出了很强的目的性，从而保证了地图创建过程的高效，并且算法本身没有对机器人的出发位置作任何限制，这使算法有了更好的适应性。

5 结束语

本文提出的群机器人地图探索策略是地图创建工作的一个重要方面，本文算法是以拓扑地图为环境表示，建立在假设机器人能够进行顶点和路径标志，可以更改标志，并且能够正确识别顶点和路径上所做标志，以及机器人可以进行全局通信的基础之上完成的，将研究重点放在了机器人在创建地图过程中如何选择探测路径，从而保证群机器人创建地图的高效完成。通过各种仿真实验的结果可以看出，本算法是有效的。下一步工作将着重对带有权值信息的拓扑地图环境进行研究，并对算法响应函数和相关参数进行优化设计，使算法更具有实用性且效率更高。

参考文献:

[1] 蔡自兴，贺汉根，陈虹. 未知环境中移动机器人导航控制研究的若干问题[J]. 控制与决策，2002，17(4): 385-390，464.

[2] 陈白帆. 动态环境下移动机器人同时定位与建图研究[D]. 长沙: 中南大学，2009: 8-9.

[3] 陈卫东，张飞. 移动机器人的同步自定位与地图创建研究进展[J]. 控制理论与应用，2005，22(3): 455-460.

[4] THRUN S. Robotic mapping: a survey[M]//Exploring Artificial Intelligence in the New Millennium. San Francisco: Morgan Kaufmann，2003: 1-35.

[5] HAYES A T，MARTINOLI A，GOODMAN R M. Swarm robotic odor localization: off-line optimization and validation with real robots[J]. Robotica，2003，21(4): 427-441.

[6] YAMAUCHI B. Frontier-based exploration using multiple robots[C]//Proc of the 2nd International Conference on Autonomous Agents. New York: ACM Press，1998: 47-53.

[7] ZLOT R，STENTZ A，DIAS M B，*et al*. Multi-robot exploration controlled by a market economy[C]//Proc of IEEE International Conference on Robotics and Automation. Washington DC: IEEE Computer Society，2002: 3016-3023.

[8] WANG H，JENKIN M，DYMOND P. Graph exploration with robot swarms[J]. International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics，2009，2(4): 818-845.

[9] 蔡自兴，贺汉根，陈虹. 未知环境中移动机器人导航控制理论与方法[M]. 北京: 科学出版社，2009: 190-191.

[10] 张国有，曾建潮. 基于黄蜂群算法的群机器人全区域覆盖算法[J]. 模式识别与人工智能，2011，24(3): 431-437.

[11] BONABEAU E，THERAULAZ G，DENEUBOURG J. Fixed response thresholds and the regulation of division of labor in insect societies[J]. Bulletin of Mathematical Biology，1998，60(4): 756.

[12] 石现. 蚂蚁劳动分工策略的计算场建模及其在资源调度中的应用[D]. 广州: 中山大学，2005: 3-4.

[13] 薛颂东，曾建潮. 群机器人研究综述[J]. 模式识别与人工智能，2008，21(2): 177-185.

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net