

文章编号: 1002-0446(2007)03-0224-06

# 未知环境下移动机器人自主搜索技术研究\*

肖潇, 方勇纯, 贺锋, 马博军

(南开大学机器人与信息自动化研究所, 天津 300071)

**摘要:** 将全区域搜索技术与基于动态模板匹配的目标识别方法相结合, 提出了一种适用于未知环境的目标物体自主搜索方法, 实现了移动机器人在陌生环境下的目标搜索任务. 具体而言, 移动机器人利用声纳和全景摄像头作为传感器来感知周围环境, 并利用模糊逻辑方法来进行局部路径规划, 在此基础上通过全区域搜索技术实现对空间的遍历, 并采用动态模板匹配方法来实现目标物体的识别及其方位的确定. 本文所提出的目标物体自主搜索方法可以从任意位置开始进行, 算法对于陌生环境具有良好的适应性. 论文最后通过实验结果证实了算法的良好性能.

**关键词:** 移动机器人系统; 模糊逻辑; 全区域搜索; 动态模板匹配

**中图分类号:** TP24      **文献标识码:** B

## Autonomous Search Technology for Mobile Robots under Unknown Environments

XIAO Xiao, FANG Yong-chun, HE Feng, MA Bo-jun

(Institute of Robotics and Automatic Information Systems, Nankai University, Tianjin 300071, China)

**Abstract** By combining an area coverage algorithm with a target recognition method based on dynamic template matching, this paper proposes an autonomous search strategy under unknown environments which enables mobile robots to fulfill target searching task in unstructured environments. Specifically, sonar and omnidirectional camera are utilized as sensors to detect the surrounding environments, and a fuzzy logic algorithm is adopted for local path planning to achieve a thorough search over the concerned area. Simultaneously, an image processing algorithm referred to as dynamic template matching method is proposed to recognize the target and determine its position. The designed search strategy can start from any initial position, and it exhibits exceptional adaptabilities over unstructured environments. Experimental results are provided to demonstrate the performance of the proposed search algorithm.

**Keywords** mobile robot system; fuzzy logic; area coverage; dynamic template matching

### 1 引言 (Introduction)

为了在未知环境中完成指定的任务, 需要移动机器人具有自主搜寻目标物体的能力, 这是一个非常具有挑战性的课题. 为此, 机器人不仅要具有路径规划、避障、自身定位等能力, 同时还要具有对全区域进行搜索遍历及在线检测识别目标物体的能力. 目前, 机器人的局部路径规划方法<sup>[1]</sup>主要有人工势场法<sup>[2]</sup>、遗传算法<sup>[3]</sup>和模糊逻辑算法<sup>[4-5]</sup>等, 其中模糊逻辑算法能实时进行路径规划, 所需存储空间小, 并克服了势场法易产生局部极小的问题, 现已被广泛采用. 针对全区域遍历搜索, Acar<sup>[6]</sup>等通过对局部搜索栅格的精确界定得到了较高的搜索效率, 但是

在实际搜索时划定栅格仍然具有一定的难度; Gabriely<sup>[7]</sup>提出了螺旋树的覆盖方法, 但由于搜索链太大, 使得搜索效率不高; González<sup>[8,9]</sup>提出了一种“回”字路径搜索方法, 但是该算法对机器人的初始搜索位置有一定的要求; Yang等提出利用神经网络方法来进行区域遍历<sup>[10]</sup>, 但是该算法通常要求预知搜索环境的模型, 并且在计算神经网络参数时具有较高的计算复杂度.

本文介绍了一种在未知环境中移动机器人自主搜索目标物体的算法, 它包括移动机器人搜索区域遍历和目标物体识别两个部分. 我们利用基于模糊

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60574027); 工业控制技术国家重点实验室开放课题基金资助项目 (0708001).  
收稿日期: 2006-06-01

逻辑的全区域搜索算法实现对所有空间位置的遍历,使得机器人可以从任意位置开始搜索,同时在搜索过程中具有很好的避障能力;在目标物体识别技术中,采用动态模板匹配方法识别目标物体,使得目标物体的识别不再受到成像大小变化的影响,成功实现了目标物体的在线识别。

## 2 移动机器人系统简介 (Description of the mobile robot system)

如图 1 所示,整个移动机器人系统由 Pioneer3 机器人、五自由度手臂(图中 Am)、通信及视觉处理服务器(一台笔记本,置于机器人平台)、无线接入点、视觉传感器(图中 Omni CCD 及其下方的 CCD)及通信客户端(图中 Client PC)组成。

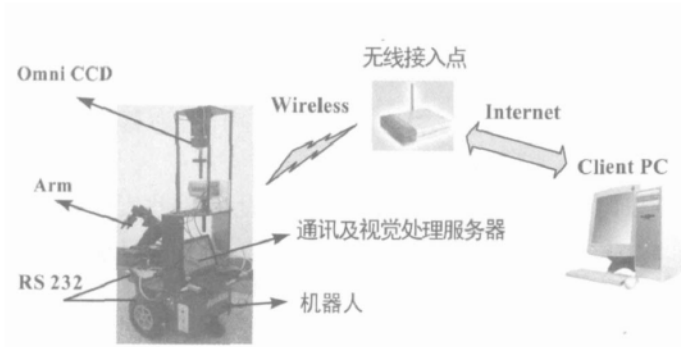


图 1 移动机器人系统  
Fig 1 Mobile robot system

整个移动机器人系统如图 1 所示,我们将通信及视觉处理服务器(一台笔记本)放置于机器人平台上,并通过 RS232 总线将服务器与机器人本体相连,通信服务器通过无线方式链接到局域网,利用基于 TCP/IP 的 socket 连接与客户端进行通信。

在移动机器人系统中,通信及视觉处理服务器负责发送指令或数据到移动机器人本体及客户端,同时接收其数据信息;移动机器人本体向服务器提供机器人当前状态信息并控制其底层的硬件及其控制系统完成来自服务器的命令请求,客户端平台利用 Windows 系统的 VC++ 6.0 开发。

## 3 基于模糊逻辑的全区域覆盖搜索算法 (Design of fuzzy logic-based complete searching algorithm)

移动机器人在执行目标物体搜索任务时,需要具有对整个空间环境进行遍历的能力。本文提出的全区域覆盖搜索算法通过对当前环境的逐步学习来

在线制定搜索策略,机器人可以从任意位置出发进行搜索。在搜索过程中,采用了模糊逻辑算法进行实时的局部路径规划,同时利用声纳的信息来计算并记录潜在的未搜索区域,使用“搜索井”逃离策略避免发生死锁,最终实现全区域搜索。下面先介绍利用模糊逻辑算法的局部路径规划方法,然后介绍基于模糊逻辑的全区域覆盖搜索算法。

### 3.1 基于模糊逻辑算法的局部路径规划

在机器人运行过程中,本文主要利用声纳所采集到的障碍物信息来实时进行局部路径规划。如图 2 所示, Pioneer 移动机器人共有 8 个声纳,声纳位于机器人前方的不同方位,声纳读数是在声纳方向上障碍物相对机器人之间的距离,范围在 15~350 cm 左右。

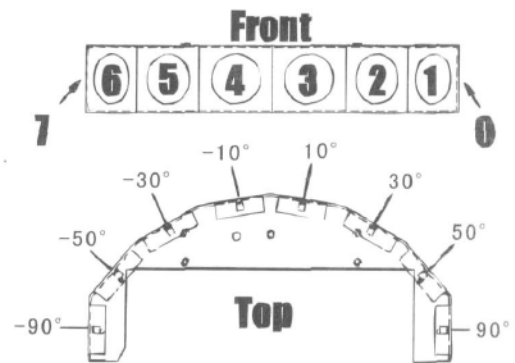


图 2 移动机器人声纳分布示意图  
Fig 2 Distribution of mobile robot sonars

在移动机器人搜索过程中,基于声纳读数利用数据融合得到机器人右、右前、前、左前、左方向上障碍物与移动机器人之间的距离,并将其作为模糊控制器的输入,另外输入还包括目标方位角度(即机器人当前方向与目标方向之间的夹角)设定值。其中,左、左前、前、右前、右声纳读数的论域均为  $[0, 3]m$ , 其模糊集合定义为 {NEAR, FAR}, 分别代表障碍物距离机器人较近、较远;目标方位角度设定值的论域为  $[-\pi, \pi]$ , 本文中模糊集合定义为 {NB, NS, Z, PS, PB}, 其中 NB、NS、Z、PS、PB 分别代表设定目标方位为负向较大、负向较小、正向、正向较小、正向较大(规定机器人左转为正,右转为负)。

模糊控制器的输出为根据当前环境信息通过模糊推理后所得到的机器人转角,其论域为  $[-\pi, \pi]$ , 模糊集合定义为 {TNB, TNS, TZ, TPS, TPB}, 其中 TNB、TNS、TZ、TPS、TPB 分别代表机器人向负向旋转较大、负向旋转较小、不转、正向旋转较小、正向旋转较大。

模糊控制器输入输出变量所对应的隶属度函数如图 3 所示. 模糊控制器中的模糊规则反映了输入输出变量之间的关系, 它主要通过经验来得到. 对于本文所设计的局部路径规划算法, 在大量实验结果

的基础上, 总结出 160 条模糊规则, 然后根据模糊推理及 Matlab 工具箱<sup>[11]</sup>可以最终生成模糊控制表. 移动机器人利用此控制表来实时规划机器人的运动轨迹.

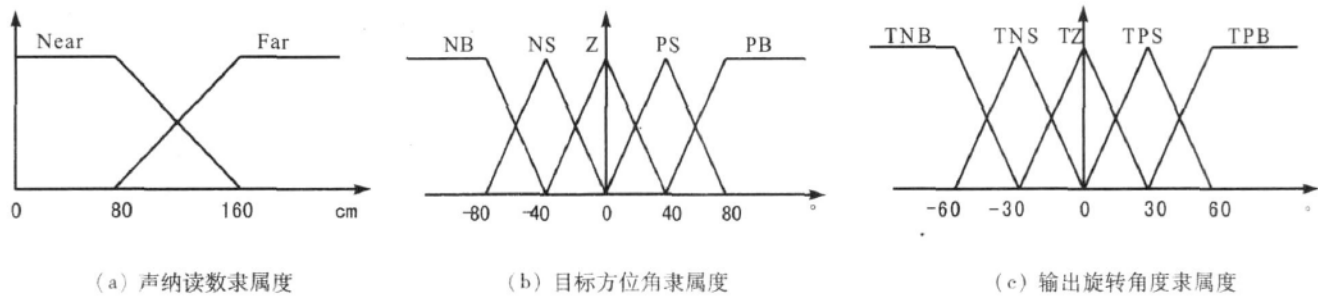


图 3 模糊控制器的隶属度函数

Fig 3 Membership functions of fuzzy control

### 3.2 基于模糊逻辑的全区域覆盖搜索算法

本文提出的基于模糊逻辑的全区域覆盖搜索算法在线将整个搜索区域根据声纳信息分成若干个正方形的搜索网格. 整个搜索算法主要包括两个基本搜索策略, 即基于路径规划的连续搜索策略和“搜索井”逃离策略.

在连续搜索策略中, 移动机器人从当前位置开始, 根据模糊逻辑所规划的路径依次进行搜索, 当机器人到达一个新的未搜索网格时, 机器人将进行目标物体搜索与识别, 否则继续进行路径规划寻找下一个网格. 在搜索过程中, 统计机器人连续经过已搜索网格的次数, 当该统计值超过一定的阈值时, 则认为机器人陷入了“搜索井”, 随即实施“搜索井”逃离策略.

在实现时, 建立了两个链表来记录机器人搜索过的网格以及未搜索网格, 它们分别为已搜索位置链表和未搜索位置链表. 算法的主要步骤概括如下:

**Step1** 机器人到达新的网格位置, 设当前连续经过已搜索位置的次数为  $n$  (初值为 0), 记录机器人

当前位置为  $P_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix}$ . 首先利用移动机器人左右声

纳检测机器人左右方向上障碍物的距离, 判断在左右方向上是否有还未到达的潜在网格位置, 如果发现这样的网格且它不存在于未搜索链表中, 则将其添加到链表中. 对于机器人当前位置, 如果它存在于已搜索位置链表中, 则需要判断机器人是否陷入“搜索井”中, 为此设置  $n = n + 1$  并转入 Step2 进行判断. 反之, 则将它添加到已搜索位置链表中, 同时如果它存在于未搜索链表中则将其删除, 然后转入 Step4

控制机器人进入下一个搜索网格.

**Step2** 如果移动机器人连续经过已搜索位置的次数  $n$  大于等于某一设定值  $N$ , 则认为移动机器人陷入了“搜索井”中, 转入 Step3 否则转入 Step4  $N$  的设定可根据整个搜索面积  $S$  与设定的搜索网格的面积大小  $S_c$  共同决定,  $N$  的初始值可根据经验由式 (1) 计算得到:

$$N = \left\lceil \frac{S}{B \times S_c} \right\rceil, N \geq 0 \quad (1)$$

**Step3** 如果未搜索链表已经为空, 则搜索完毕退出; 否则, 在未搜索链表中查询与机器人当前位置距离最近的未搜索位置, 控制机器人到达这个指定的未搜索位置. 在控制机器人运动到指定未搜索位置的过程中, 我们将实时计算机器人当前位置与指定到达网格之间的方位角, 将此方位角输入到模糊控制器中来实现到达最近未搜索位置的路径规划. 一旦机器人到达最近的未搜索位置后, 则将此位置节点从未搜索链表中删除并添加到已搜索位置链表中, 同时重新设定  $n = 0$   $N = \frac{N}{2}$ , 记录机器人当前位置  $P_i$ , 转入 Step4

**Step4** 设搜索网格边长为  $d$ , 并且设定模糊控制器中输入变量目标方位角度为  $\theta$  利用局部路径规划算法控制移动机器人运动, 并实时记录机器人的位置  $P_{i+1}$ , 如果机器人当前位置  $P_{i+1}$  与上一个搜索位置之间的距离大于搜索网格边长  $d$ , 即  $\|P_{i+1} - P_i\| > d$ , 则表明机器人进入了新的搜索网格, 因此让机器人停止运动并转入 Step1

在连续搜索策略中, 未搜索网格坐标的计算方法如下, 若障碍物与机器人之间的距离大于某一设

定值  $D$ , 则认为在此方向上有潜在的未搜索网格. 根据预先设定的搜索网格的大小来计算这些未搜索区域的位置坐标, 设声纳方向与机器人坐标系  $x$  轴夹角为  $\alpha_s$  (见图 2),  $r$  为机器人半径,  $(x_s, y_s)$  为潜在未搜索网格的中心位置坐标, 则

$$\begin{aligned} x_s &= (d+r) \cos \alpha_s \\ y_s &= (d+r) \sin \alpha_s \end{aligned} \quad (2)$$

设机器人在全局坐标系下坐标为  $(x_r, y_r, \theta_r)^T$ , 则未搜索网格在全局坐标系下的坐标  $(x_o, y_o, \theta_o)^T$  为:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_o \\ y_o \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_r & -\sin \theta_r \\ \sin \theta_r & \cos \theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \end{bmatrix} \\ \theta_o &= \theta_r + \alpha_s \end{aligned} \quad (3)$$

## 4 目标物体的识别及方位确定 (Target recognition and localization)

### 4.1 基于动态模板匹配技术的目标物体识别

在搜索过程中, 我们采用模板匹配技术实现目标物体的识别. 模板匹配技术即在图像中寻找与目标图像相似的区域. 在目标物体搜索过程中, 由于移动机器人是在不断运动中进行目标搜索的, 所以机器人与目标物体之间距离的不断变化将导致目标物体的成像大小不断变化. 在这种情况下, 如果根据固定不变的预知物体图像进行模板匹配, 则很容易导致目标识别的失败.

针对这个原因, 我们提出了一种动态模板匹配算法. 与常规的模板匹配算法不同, 我们不是根据预先得到的目标图像进行模板匹配, 而是在机器人搜索过程中, 根据当前采集的图像动态生成与其相匹配的目标图像, 然后利用所生成的目标物体图像作为模板进行匹配.

下面简单描述动态模板匹配算法的基本步骤:

(1) 图像预处理阶段: 选用的目标物体如图 4 (a) 所示, 将搜索过程中采集得到的图像 (图 4 (b)) 进行预处理, 其中包括图像平滑、对比度拉伸、去噪、二值化等, 经过预处理的图像如图 4 (c) 所示.

(2) 初步筛选阶段: 根据目标物体的长宽比例, 利用区域生长法对整个图 4 (c) 上的每个区域进行判断, 将图像中过大的区域 (背景)、过小的区域 (噪声) 及不符合目标物体长宽比例的区域去掉, 剩下的若干区域 (如图 4 (d)) 则是目标物体图像的备选区域.

(3) 动态模板生成及匹配分析: 至此, 图像上可能留下若干个与目标物体长宽比例近似的区域. 为

了从这些区域中选择出真正的目标物体图像, 依次按照每个备选区域的长宽比例, 将已知目标物体的图像拉伸到此比例, 然后将拉伸后的目标物体图像作为预知模板, 与图像上这个备选区域进行模板匹配.

从所有备选区域中挑选出相似度最大的区域, 如果这个相似度大于某个设定的阈值, 则将此区域作为目标物体所在区域. 匹配结果如图 4 (e) 所示.

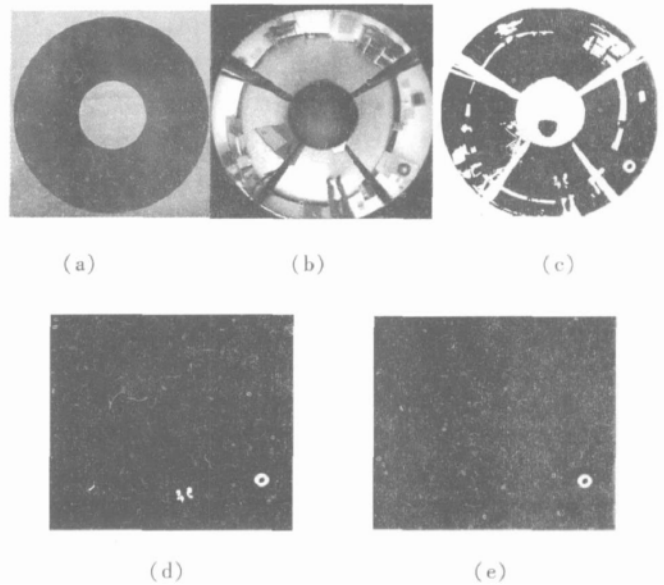


图 4 动态模板匹配实现步骤  
Fig 4 Dynamic template matching steps

### 4.2 目标物体的方位确定

利用动态模板匹配方法识别出目标物体后, 需要确定目标物体在移动机器人坐标系和全局坐标系下的方位, 然后控制机器人运动到目标物体附近.

由于全景摄像头固定在移动机器人上, 因此全景摄像头相对机器人的位置是固定的. 如图 5 所示, 建立以全景图像中间黑色圆形区域的中心为原点 (此中心基本与移动机器人坐标系的原点重合) 的二维坐标系  $XOY$ , 并利用机械装置确保机器人自身坐标系与在图像上所建坐标系  $XOY$  重合 (误差大概在  $1 \sim 2^\circ$ ), 其中设坐标系原点在图像坐标中的坐标为  $(u_0, v_0)$  (像素), 设目标物体在图像坐标中的坐标为  $(u', v')$  (像素), 则目标物体在移动机器人坐标系中的方位角  $\alpha'$  计算方法如下:

$$\alpha' = \text{atan2}(u_0 - u', v_0 - v') \quad (4)$$

计算得到目标物体在移动机器人坐标系下的方位角  $\alpha'$  后, 可以利用式 (3) 得到目标物体在全局坐标系下的方位角  $\theta_o$ :

$$\theta_o = \alpha' + \theta_r \quad (5)$$

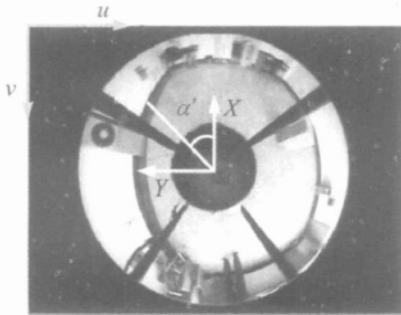
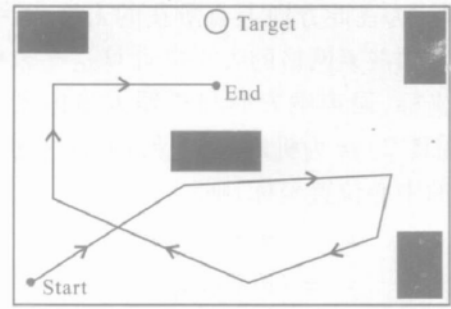


图 5 目标物体在图像中的方位  
Fig 5 Target localization on the image



(b)

图 6 移动机器人自主搜索目标物体实验结果  
Fig 6 Experimental results of mobile robot autonomous searching

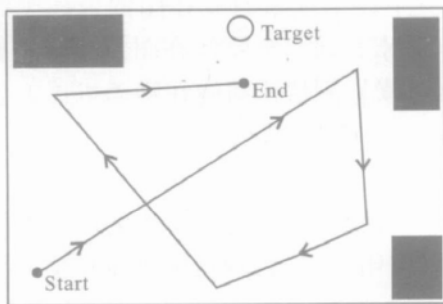
### 5 实验结果 (Experimental results)

为了验证上述搜索及目标识别算法的可行性, 分别在如图 1所示的移动机器人系统的客户端与服务器端开发了相应的软件测试平台, 并利用测试平台对算法进行了测试.

在实验中, 移动机器人的搜索区域约为  $25 \text{ m}^2$ , 根据多次实验测试与全景摄像头的拍摄范围, 设定每个搜索网格的大小为  $0.8 \times 0.8 \text{ m}^2$ , 全景摄像机拍摄图像大小为  $640 \times 480$  像素, 机器人的半径  $r$  为  $260 \text{ cm}$ . 在搜索算法中, 设  $D = 1.6 \text{ m}$ ,  $d = 0.8 \text{ m}$  (判断机器人左右方向上是否有新的搜索区域); 根据式 (1) 及实验环境,  $N = 10$  在全景图像 (图 5) 所示坐标系原点的像素值为:

$$(u_0, v_0) = (315, 240) \quad (6)$$

图 6 给出了利用上述方法搜索目标物体的实验结果, 其中黑色方块代表静止的障碍物, 图上方的白色圆圈代表目标物体. 移动机器人从图中左下角位置开始搜索, 全局坐标系原点设在机器人初始搜索位置处, 直线代表移动机器人的运动轨迹, 其上的箭头代表运动的方向, 通过实际测量得到目标物体在全局坐标系下的真实方位角为  $\theta_{ori} = 55^\circ$ , 图 6(a) 和图 6(b) 分别记录了在不同的实验环境下完成搜索任务时移动机器人所走过的运动轨迹.



(a)

在图 6(a) 所示环境下, 移动机器人在经过第 20 个搜索区域时发现目标物体, 通过图像识别得到目标物体在图像中的坐标为:

$$(u'_1, v'_1) = (123, 276) \quad (7)$$

利用式 (4) 计算目标物体相对机器人的角度为:

$$\alpha'_1 = 100^\circ \quad (8)$$

通过移动机器人定位, 已知移动机器人当前在全局坐标系下的方位角为:

$$\theta_{ri} = -41^\circ \quad (9)$$

根据式 (5) 及式 (9) 得到目标物体在全局坐标系下的方位角为:

$$\theta_{o1} = 59^\circ \quad (10)$$

则目标物体方位角定位的误差为:

$$e_1 = |\theta_{ori} - \theta_{o1}| = 4^\circ \quad (11)$$

此方位角定位误差主要来自移动机器人定位误差.

对于图 6(b) 中的环境, 移动机器人在经过第 17 个搜索区域时发现目标物体, 目标物体图像坐标及方位角分别为  $(u'_2, v'_2) = (117, 263)$ ,  $\alpha'_2 = 97^\circ$ ; 移动机器人在全局坐标系下的方位角为  $\theta_{ri} = -39^\circ$ , 根据这个信息可以计算得到目标物体在全局坐标系下的方位角为  $\theta_{o1} = 58^\circ$ .

在获得目标物体在全局坐标系下的方位角后, 利用声纳的读数可以获得目标物体与机器人之间的距离, 最终利用式 (2) 与式 (3) 计算得到目标物体在全局坐标系下的位置坐标.

### 6 结论 (Conclusion)

针对未知的工作环境, 本文设计了一种适用于移动机器人的目标物体自主搜索方法. 整个算法包括基于模糊逻辑的全区域覆盖搜索和基于动态模板匹配的目标识别两个部分. 与常规的覆盖搜索算法相比, 基于模糊逻辑的全区域覆盖搜索算法可以从

任意位置开始搜索,并且具有很好的避障能力,此外,它还具有易于实现、适应性好等优点;而动态模板匹配算法则有效地解决了常规算法中的模板图像选择问题,提高了目标物体识别的准确度.多次实验测试表明,本文所提出算法可以很好地完成移动机器人在陌生环境下自主搜索目标物体的任务.

### 参考文献 (References)

- [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] Hwang Y K, Ahuja N. A potential field approach to path planning[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1992, 8(1): 23-32
- [3] 张文志,吕恬生. 基于改进的遗传算法和模糊逻辑控制的移动机器人导航[J]. 机器人, 2003, 25(1): 1-6
- [4] 付宜利,顾晓宇,王树国. 基于模糊控制的自主机器人路径规划策略研究[J]. 机器人, 2004, 26(6): 548-552
- [5] Yung N H C, Cang Y. An intelligent mobile vehicle navigator based on fuzzy logic and reinforcement learning[J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, 1999, 29(2): 314-321
- [6] A car E U, Choset H. Robust sensor-based coverage of unstructured environment[A]. Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems[C]. Piscataway, NJ USA: IEEE, 2001, 61-68
- [7] Gabriely Y, Rimon E. Competitive on-line coverage of grid environments by a mobile robot[J]. Computational Geometry: Theory and Applications, 2003, 24(3): 197-224
- [8] González E, Alarcón M, Aristizábal P, et al. BSA: A coverage algorithm[A]. Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems[C]. Piscataway, NJ USA: IEEE, 2003, 1679-1684
- [9] González E, Alvarez O, Díaz Y, et al. BSA: A complete coverage algorithm[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. Piscataway, NJ USA: IEEE, 2005, 2040-2044
- [10] Yang S X, Luo C. A neural network approach to complete coverage path planning[J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, 2004, 34(1): 718-724
- [11] 叶军. 模糊控制系统的计算机设计与仿真的研究[J]. 计算机仿真, 2002, 19(6): 49-52
- [2] Adam J A. Medical electronics[J]. IEEE Spectrum, 1995, 32(1): 80-83
- [3] Aström K J, Hang C C, Persson P, et al. Towards intelligent PID control[J]. Automatica, 1992, 28(1): 1-9
- [4] Suzumori K, Ikura K, Tanaka H. Development of flexible micro-actuator and its applications to robotic mechanisms[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. Piscataway, NJ USA: IEEE, 1991, 1622-1627.
- [5] 米智楠,钱晋武,龚振邦,等. 内窥检查系统主动引导驱动技术的研究[J]. 高技术通讯, 2001, 11(6): 70-71.
- [6] 刘鸿文. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003
- [7] 吴家龙. 弹性力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2001.
- [8] 徐炳辉. 气动技术基础知识[J]. 液压与气动, 1994, 1: 39-41
- [9] Tian S P, Ding G Q, Yan D T, et al. Nonlinear controlling of artificial muscle system with neural networks[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics[C]. Piscataway, NJ USA: IEEE, 2004, 56-59
- [10] Omatu S, Iwasa T, Yoshioka M. Skill-based PID control by using neural networks[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Systems Man and Cybernetics[C]. Piscataway, NJ USA: IEEE, 1998, 1972-1977.
- [11] Iwasa K, Morizumi N, Omatu S. Pressure control in a plant generating chloride by neural network PID control[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks[C]. Piscataway, NJ USA: IEEE, 1995, 627-630

(上接第 223 页)

### 作者简介:

肖 潇 (1981-), 女, 硕士. 研究领域: 机器视觉, 移动机器人技术.

方勇纯 (1973-), 男, 博士, 教授, 博士生导师. 研究领域: 复杂系统非线性控制, 机器人视觉控制等.

### 作者简介:

肖 潇 (1981-), 女, 硕士. 研究领域: 精密工程及智能微系统.

颜国正 (1961-), 男, 博士, 教授. 研究领域: 微机械, 特种机器人, 机电一体化.

于莲芝 (1966-), 女, 副教授. 研究领域: 检测技术与自动化装置, 机电一体化, 特种机器人.