

# 智能割草机的区域全覆盖算法设计与仿真

许兴军

(浙江大学 电气自动化研究所, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 为解决无导航功能的智能割草机割草区域最佳覆盖的问题,提出了“单元分解目标区域,并逐一覆盖”的区域全覆盖算法。首先介绍了区域全覆盖的总体策略,接着基于特定割草机硬件,采用了单元分解法作为全区域覆盖算法的整体策略,对每个子区域则选择往复式行走方式进行逐一覆盖。然后具体提出了无障碍物区域和两障碍物区域的离线全覆盖算法,并对有障碍区域的算法加以改进和推广。随后基于 Matlab 软件,对有两圆形障碍物的圆形区域进行了全区域覆盖算法的仿真实验。实验结果表明,所提出的区域全覆盖算法可以实现割草区域的最优覆盖。

**关键词:** 智能割草机;区域全覆盖;电子篱笆;全覆盖仿真;Matlab

中图分类号: TP391; TH69; TP242

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)03-302-05

## Design and simulation on regional all-covered algorithm of intelligent mower

XV Xing-jun

(Institute of Electrical Automation, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of covering the lawn area by the intelligent mower with no function of navigation, a regional all-covered algorithm by decomposing the target area and covering one by one was presented. Firstly the regional all-covered strategy was introduced, then the cell decomposition algorithm was selected as a region-wide coverage of the overall strategy based on the hardware conditions of the mower, and the walking way of back and forth was used for each sub-area. A detailed description of the off-line algorithm for full coverage was presented to the region with no obstacle and two obstacles, and the algorithm for region with obstacles was promoted and improved. The regional all-covered algorithm for a circular area with two circular obstacles was tested based on Matlab. The experimental results show that the regional all-covered algorithm presented can achieve the best coverage of the target lawn area.

**Key words:** intelligent mower; regional all-covered; electronic fence; all-covered simulation; Matlab

## 0 引言

对于移动机器人而言,传统的路径规划指点到点的最优路径规划,其目标是寻求一条从起始点到终点的无碰撞的最优路径,该路径大多是点到点的线段序列。割草机器人的路径规划是基于全区域覆盖运行的路径规划(Complete Coverage Path Planning, CCPP),所谓全区域覆盖是指移动机器人的运行轨迹要能够无遗漏覆盖整个工作区域。因此全区域覆盖的路径规划目标是产生一条有效路径来覆盖工作环境的每块可达区域。除了割草机器人外,基于 CCPP 的移动机器人

有很多应用场合,如清洁机器人、喷漆机器人、地表探测机器人等,因此 CCPP 的研究越来越受到关注<sup>[1-7]</sup>。

割草机器人的工作环境一般比较复杂,基于已知环境模型的精确路径规划在实践上一般较难实现,且对定位系统的分辨率要求较高,从而增加了系统的成本和实现的难度。市面上多数智能割草机出于成本考虑,硬件配置有限,所以本研究从智能割草机的实际出发设计区域全覆盖策略。

## 1 智能割草机控制原理

本研究通过对市场上现有智能割草机的分析,可

获得智能割草机控制框架图如图 1 所示。

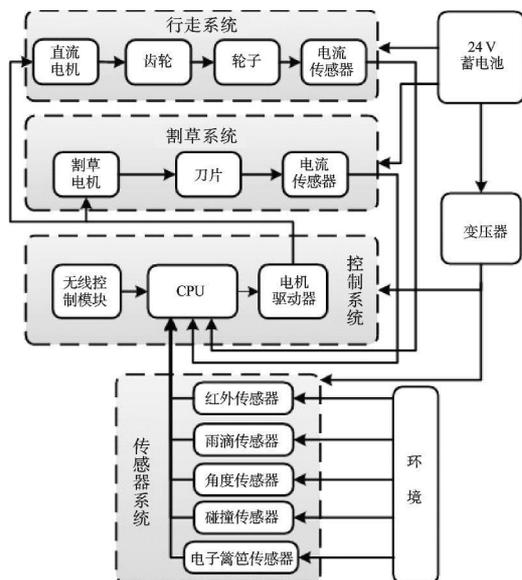


图 1 智能割草机控制结构图

智能割草机控制原理的分析内容主要包括:电源、传感器系统、控制系统、割草系统以及行走系统 5 个方面,具体分析如下:

(1) 电源。24 V 的蓄电池可直接为割草系统和行走系统提供电源,经变压器降压后才能为传感器系统和控制系统提供电源。

(2) 传感器系统:红外传感器,具有避障的作用。当割草机靠近障碍物时,红外传感器能帮助识别障碍物,并将这一信息传送给控制系统以避开障碍物。

雨滴传感器,具有避雨的作用。在下雨的环境下,落到割草机上的雨滴能被雨滴传感器识别,控制系统获得信号后将驱动割草机到无雨区避雨。

角度传感器,具有保证人身安全的作用。当割草机遇到斜坡翻转或被小孩提起成一定角度时,角度传感器能将这一信号传送给控制系统,控制系统会立即关闭割草电机,保证人身安全。

碰撞传感器,既能保证人的安全也能保证小车的。一旦小车受到一定强度碰撞,控制系统会关闭小车所有电机。这样可以避免小车受损,如果被撞的物体是人,也就保障了人的安全。

电子篱笆传感器,它一方面可以保证割草机始终在电子篱笆所围的范围内割草,另一方面是割草机返回充电所依据的路线。

(3) 控制系统。控制系统的核心是 CPU,它一方面接收传感器系统、割草系统和行走系统的信号,并根据这些信号通过相应的运算得到结果,再根据结果来控制电机驱动器以实现割草系统和行走系统的控制。另一方面它还能接收无线模块的信号以实现人工控制割草机运行。

(4) 割草系统。控制系统中的割草电机驱动器能驱动割草电机,从而带动刀片的转动,以实现割草功能。该系统中的电流传感器用于保护割草电机,因为当刀片意外卡住时,电路中的电流会立刻变大而烧坏电机。但电流传感器能将电流值反馈到控制系统,一旦出现过流,控制系统就会立刻关闭割草电机以防止烧坏。

(5) 行走系统。行走系统中有两个直流电机,分别控制割草机的两个轮子。直流电机先作用于齿轮,由齿轮来带动轮子转动,以实现割草机的前进和后退。它由控制系统控制,此处的电流传感器所起的作用与割草系统中电流传感器所起的作用一样,都起保护电机的作用。

## 2 区域全覆盖策略选择

### 2.1 智能割草机约束条件

(1) 智能割草机具有两对相互垂直的电子篱笆传感器,具体结构如图 2 所示。电子篱笆信号与传感器和篱笆线的距离以及两者之间所成的角度有直接关系,一般来说,传感器与篱笆线的距离越远,角度越大,电子篱笆信号就越弱。所以图中传感器 1、2 此时能检测到很强的电子篱笆 1 的信号,却几乎检测不到电子篱笆 2 的信号。同样传感器 3、4 此时能检测到很强的电子篱笆 2 的信号,却几乎检测不到电子篱笆 1 的信号。因此,本研究通过传感器的信号状况可以判断电子篱笆的位置。

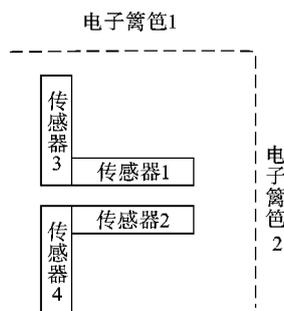


图 2 电子篱笆传感器结构

(2) 直线行走和转弯。经实验表明,本研究的割草机在平地上能实现直线行走,转弯的半径也能得控制。

(3) 无法定位。即割草机运行时的位置信息未知。因为本研究的割草机是一个商业化产品,鉴于成本的考虑,在割草机上没有装备用于定位的硬件。

(4) 无记忆路径功能。因为本研究无法记录已行走的路径,故无法判断现在所处的位置是否已经覆盖过。

### 2.2 覆盖方法选择

由于移动机器人的全区域覆盖在现实生活中具有广泛的应用,近年来,国内外许多学者进行了大量

的研究,出现了很多覆盖方法,如随机覆盖策略、单元分解法、基于模板的方法、基于传感器的覆盖方法等,各种方法都具有一定的适用场合和优缺点。

随机覆盖策略是指机器人无法直行时就随机地转个角度继续前进,该策略对机器人的感知和计算能力要求不高,无需定位传感器且算法简单,但不能保证完全覆盖整个区域,重复覆盖率高,效率很低。本研究中割草机的硬件条件虽然比较符合该方法,但由于不能保证完全覆盖,使得割草机完成不了任务,故不采用该方法。

单元分解法可保证区域的完全覆盖,是目前全区域覆盖算法中运用最广的方法之一。它以障碍物为边界,将空闲区域分解为一些互不重叠的单元,由于单元中不包含任何障碍物,机器人可用简单的往返运动实现单元覆盖,区域的全覆盖就转变为从一个单元到另一个单元的运动规划。该方法最关键的问题就是区域划分和实现单元衔接,若能解决这两个问题就能实现全区域覆盖,这是一个可选择的方法。

基于模板的方法是根据已覆盖区域所获取的先前信息,将当前环境信息与各个模板进行匹配;重复地预测新区域并执行区域覆盖,从而整个覆盖路径就转换成执行一系列不同的模板。该方法需要记忆一些模板,本研究的割草机无法达到此要求,故该方法对本研究不适用。

基于传感器的全区域覆盖是指在未知环境中利用传感器的信息寻找一条路径,使机器人或机器人的传感器遍历所有区域并执行相应任务。该方法对传感器要求很高,对本研究也不适用。

因此,单元分解法比较适合本研究的智能割草机,本研究也将采用该方法。

### 2.3 单元行走方式选择

首先,本研究考虑无障碍时能充满整个区域割草机的行走方式。其规划过程应遵循如下原则:①保证区域全覆盖;②规划出的路径便于控制,易于实现;③割草时间尽量短,消耗能量尽量少。从能耗方面来说,割草机直线行走消耗的能量相对来说比较少,当割草机曲线行走时,所消耗的能量就比较大。对于控制系统来说,直线行走比较容易控制,曲线行走就很难控制,所以割草机应尽可能选择直线段作为主要运动轨迹。

通常割草机以直线运动方式充满整个工作区的路径类型有:随机方式、往复方式及螺旋方式(包括内螺旋和外螺旋)。如采用不同的行走路径,割草机的覆盖区域效率和效益上都会不一样,在割草机消耗的时间和能量上也会不一样,行走路径越长,转弯次数越多则割草机消耗的能量和时间也就越多。随机方式不

管是在区域覆盖率还是消耗时间上都是不理想的,所以这里不予考虑。当区域边界为曲线时,采用螺旋的方式就会导致割草机曲线行走,那样不但消耗能量大而且难于控制。若强制要求割草机直线螺旋,则边界地区的覆盖就会出现问题的。

当区域内有障碍物时,本研究就需要对区域进行分割,然后让割草机在各子区域内分别完成完全覆盖。由于本研究的割草机没有自导航功能,割草机对自身的位置并不明确。如果采用内螺旋方式,它在子区域内最后停留的地方大致在子区域重心,这时让它自主地从该子区域精确的行走走到另一个子区域,在没有导航的情况下基本上是不可能实现的。同样的道理,若采用向外螺旋,那么起点的位置就很难定位。

综上所述,本研究选择往复式行走路径,在没有障碍时它不但能实现完全覆盖,而且在边界是曲线的情况下依旧能保证行走,这不但耗能少而且易于实现。在有障碍的情况下,通过一定的方法划分子区域,它也能保证直线行走,并且它在完成自区域覆盖后会停留在子区域边界,这样在无导航的情况下,割草机也能从这一子区域进入其相邻的未被覆盖的子区域进行覆盖。

## 3 区域全覆盖算法设计

智能割草机需覆盖的区域类型分为两种:基本(无障碍)区域和有障碍区域。对于基本区域,由于无障碍,容易覆盖。有障碍区域又可分为简单有障碍区域和复杂有障碍区域。

### 3.1 基本区域的覆盖

基本区域是指具有任意闭合曲线边界且内部无障碍物的区域,它是智能割草机全区域覆盖运行空间的最基本的单元。

本研究选择水平方向作为割草机行走方向,并采用反复式覆盖来覆盖这一区域,具体情况如图 3(a)所示。图中的实际边界指的是需要覆盖区域的边界;名义边界指覆盖过程中到达实际边界后,需要进行转向,其转向顶点组成的边界。名义边界比实际边界多出一个转向半径。因为这样使得割草区域超出了边界,后期笔者对此进行了改进,如图 3(b)所示,主要是

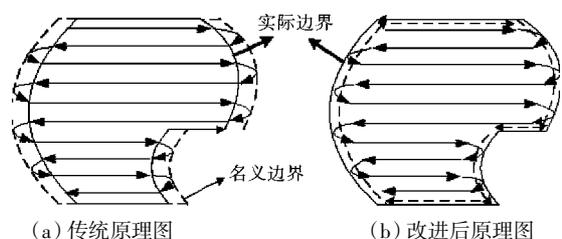


图 3 基本区域覆盖原理图

让割草机提前开始转弯,不过这样造成的问题就是在边界区域会有一部分草坪因为割草机转弯而被遗漏,为了解决这一问题,在割草机覆盖完整个区域后,本研究再让其沿着边界行走一圈,以实现真正的全覆盖。

### 3.2 有障碍区域的覆盖

有障碍区域是指由一条闭合曲线包围的、其内部含有静止和运动障碍的区域。对于运动障碍物(如动物和车辆等),割草机器人探测到后,控制系统驱动它停止直至运动障碍离开它的运动轨迹,当超过预定等待时间后,控制系统将其处理为静止障碍。对于静止障碍物,如果是一般小型物体(如树木、标杆等),可直接绕过,如果是大型的(如花坛、水池等),则在全局路径规划中予以考虑。

有障碍区域可以按基本直线运动方向划分为若干个无障碍物的基本区域,然后按一定的次序不重复地分别覆盖各个基本区域。对于基本区域的确定,本研究可以用障碍物在水平方向的切线作为边界对区域进行划分,然后用从左到右或从右到左的割草方式来进行整体区域的覆盖。

本研究考虑一个比较复杂的有障碍区域如图 4(a)所示,该草地区域边界是曲线的,内部还有两个曲线边界的障碍区域。正如上面所说的,对于这样的区域,本研究可以水平线去分割区域,以障碍物的切线为边界对区域进行子区域的划分,运用从右到左的策略,对图 4(a)划分区域后,可以得到 3 个子区域,如图 4(b)所示。

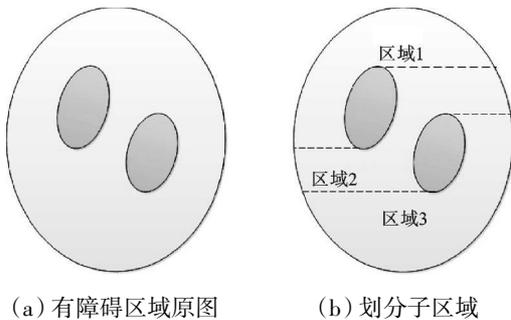


图 4 有障碍区域划分子区域

对于划分后的子区域,本研究可以采用基本区域的覆盖方式进行覆盖,具体如图 5 所示。智能割草机的起点为 A,随后割草机就水平向前行进对区域进行覆盖,直到到达边界再转弯,其运行模式和基本区域覆盖基本一样。当割草机对区域 1 覆盖完毕后,它就会沿着障碍物的边界曲线 C2 行走走到点 B,再沿着边界曲线 C1 回到点 C,这是为了清除割草机转弯引起的遗漏的地方。然后,割草机再次沿着障碍物的边界曲线 C2 行走走到点 B,由此衔接到区域 2,并作为区域 2 覆盖的起点。对区域 2 的覆盖仍旧和基本区域覆盖

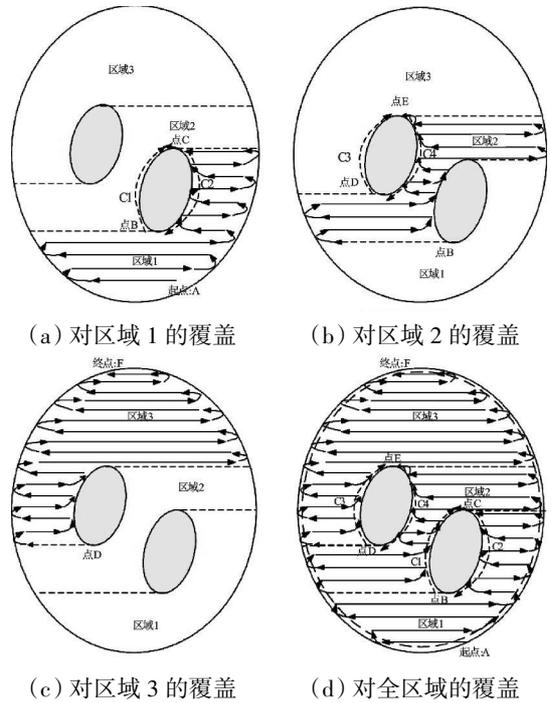


图 5 有障碍区域覆盖原理图

方式一样,当割草机完成区域 2 的覆盖后,它也会沿着障碍物边界曲线 C3, C4 绕障碍物一圈后,再沿着 C4 行走走到点 C,从而进入区域 3,并且 C 作为区域 3 覆盖的起点。同理完成区域 3 的覆盖,到达终点 D。最后,再由终点 D 让割草机沿着边界曲线绕一圈以清除遗漏草坪,这样智能割草机也就完成了对整个有障碍区域的完全覆盖。

### 3.3 全覆盖策略的推广

上述研究讨论了两个障碍物的情况,若障碍物增长到  $n$  个,可以将上述方法做如下推广:

如果障碍的数目为  $n$ ,那么平行分割线的数目为  $2n$ ,被分割的基本区域为  $n+1$ ,在这  $n+1$  个基本区域内做局部路径搜索  $n$  次以产生  $2n$  个有向弧  $C_i$  ( $i=1, \dots, 2n-1$ )。通过基本区域  $R_i$  ( $i=1, \dots, n-1$ ) 的覆盖操作和产生有向弧  $C_i$  ( $i=1, \dots, 2n-1$ ) 的局部路径搜索操作,智能割草机依次经过每个基本区域,有向弧也能首尾相接。如果把起始点和结尾点连接起来,移动机器人整个行走路径将是封闭的。整个区域覆盖过程是连续、不间断的。

考虑到实际情况,本研究将割草机来回直线行走间的距离调整为割草机宽度的一般,以获得 50% 的余量来确保 100% 的覆盖。

## 4 基于 Matlab 的区域全覆盖仿真

### 4.1 系统建模

(1) 智能割草机。在给出车体模型之前,假定如下:轮式移动智能割草机和地面之间是纯滚动的;轮

式移动智能割草机在平面之上运行;轮式移动智能割草机是后轮驱动,后轮差动转向;轮式移动智能割草机不考虑侧倾对横向运动的影响。

再考虑到智能割草机头部和尾部都是圆弧型的,本研究就用一个半径为 0.2 cm 的圆表示。这样割草机每次割草宽度为 0.4 cm,并以 0.2 cm 作为其转弯半径。

(2) 边界和障碍物。仿真中的边界均用深灰色的直线或曲线表示,它是一些坐标的集合体。障碍区用深灰色填充区域表示,其边界也依旧用深灰色直线或曲线表示。

(3) 草坪。浅灰色区域代表未被割草机覆盖的草坪,黑色区域则代表已被覆盖的草坪。

(4) 电子篱笆信号。由于实际的电子篱笆信号与传感器和篱笆线的距离以及两者之间所成的角度有关系,距离越远信号越小,角度的余弦值越小信号越小。由此,本研究采用如下公式来模拟电子篱笆信号:

$$L = \sqrt{[now(x) - bod(x)]^2 + [now(y) - bod(y)]^2}$$

$$\cos\theta = |now(x) - bod(x)| \div L$$

$$S = L \cdot \cos\theta$$

式中: $now(x)$ —割草机当前位置的  $x$  坐标; $now(y)$ —割草机当前位置的  $y$  坐标; $bod(x)$ —边界  $A$  点的  $x$  坐标; $bod(y)$ —边界  $A$  点的  $y$  坐标; $L$ —割草机当前位置离边界  $A$  点的距离; $\cos\theta$ —割草机当前位置与  $A$  点的连线和割草机前进方向所成角的余弦值的绝对值; $S$ —割草机接收到的某一小段  $A$  电子篱笆产生的信号。

(5) 信号搜索范围。当割草机和边界的距离大于某个值后,割草机接收到的电子礼包信号几乎可以忽略,所以在模拟割草机接收信号的时候本研究设定了搜索范围,本研究的搜索范围是以割草机的质心为圆心,以 0.4 cm 为半径的圆形区域。

#### 4.2 区域全覆盖仿真

对应基本区域的仿真,由于不存在子区域间衔接的问题,仿真相对比较简单,选定起点后进行往复式覆盖后都能实现全覆盖目标。对于有障碍区域的仿真关键在于两点:①区域的划分;②子区域间的衔接。然后根据基本区域覆盖的仿真算法就能实现对单障碍物区域、双障碍物区域的覆盖仿真。

本研究对复杂的圆形边界双圆形障碍物区域进行了全覆盖仿真实验,具体如图 6 所示。本研究先把整体区域分成 3 个子区域,从区域 1 开始覆盖,如图 6(a)所示。本研究按同样的方法进行往复式覆盖,完成对区域 1 的覆盖,如图 6(b)所示。接着再沿障碍物边界绕行 1 圈半,一方面清除了因转弯而在障碍物边界引起的遗漏草坪,另一方面也使得割草机进入区域 2

进行覆盖,如图 6(c)所示。本研究采用同样的方法就可以完成对区域 2,3 的覆盖,最后沿草坪边界绕行一圈以实现对整个区域的全覆盖。

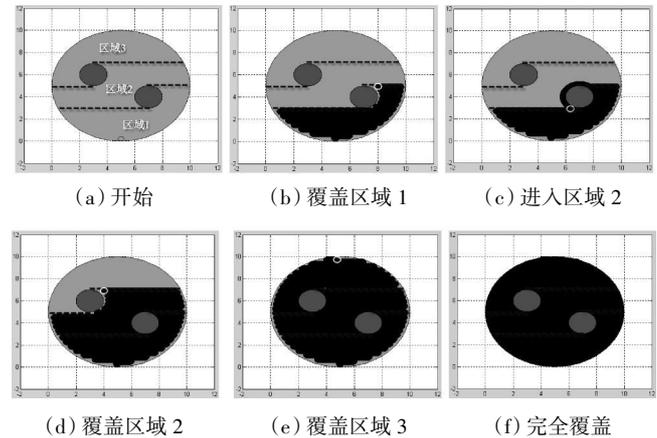


图 6 双障碍物区域全覆盖仿真

仿真结果表明,采用本研究的区域全覆盖算法,理论上可以实现目标区域 100% 的覆盖。

## 5 结束语

本研究通过仿真效果图证明了笔者提出的区域全覆盖策略的可行性,但该方法仍有一定局限性:①提出区域全覆盖策略是基于本研究的智能割草机特定的硬件条件而设计的,虽然对于本研究的割草机是最优的策略,但如果智能割草机的硬件条件提升,如割草机能准确定位时,该策略将不再最优;②如果覆盖区域或障碍物边界十分不规则,那么该算法的编程工作量会很大,且实际覆盖效果也将受影响;③该算法假设覆盖区域地面是平整的,故如果地面有坡度,基于该算法将无法实现目标区域的完全覆盖。

#### 参考文献(References):

- [1] 李开生. 通用擦窗机器人控制系统体系结构的研究和实现[D]. 北京:北京工业大学机电学院,2001.
- [2] 张毅刚,刘杰. 单片机原理及应用[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2004.
- [3] 方建军,何广平. 智能机器人[M]. 北京:北京化学工业出版社,2004.
- [4] 朱长宏. 轮式可移动机器人的研究[D]. 南京:南京航空航天大学机电学院,2001.
- [5] 章小兵,乔茹,赵光兴. 基于改进蚁群算法的机器人全局路径规划[J]. 机电工程,2009,26(3):90-93.
- [6] 刘松,李志蜀,李奇. 机器人全覆盖最优路径规划的改进遗传算法[J]. 计算机工程与应用,2009,45(31):245-248.
- [7] 祖莉. 割草机器人全区域覆盖运行的控制和动力学特性研究[D]. 南京:南京理工大学机械工程学院,2005.

[编辑:李辉]