

文章编号:1001-9081(2012)06-1506-07

doi:10.3724/SP.J.1087.2012.01506

移动无线传感网络节点协同避障的改进方法

陈佐, 万新*, 涂员员, 李仁发

(湖南大学信息科学与工程学院, 长沙 410082)

(*通信作者电子邮箱 sean.onex@gmail.com)

摘要:传统蜂拥控制模型在协同避障跟踪方面, 目前有 Reynolds 和 Tanner 的蜂拥模型。笔者曾对其做出了改进, 提出了与 Steer to Avoid 法则相结合的避障模型, 该模型在跟踪过程中对凸形障碍有较高的避障效率。由于在 Steer to Avoid 的方向判断中, 目标对节点具有引力, 使节点群陷入凹形区域无法绕出。将协同避障模型引入凹形障碍环境中, 对模型进一步改进, 在 Steer to Avoid 转向判断时暂时取消目标对节点群的引力, 让节点群在进入凹形后自行做出环境的判断并沿着障碍边缘不断搜索路径, 最终绕出障碍到达目标。仿真实验结果表明: 与传统两个模型相比, 该模型在避障的平均速率和时间效率上有显著提高, 适用于避开未知的凹形障碍。

关键词: 移动无线传感器网络; 避障; 协同; 蜂拥控制; 凹形障碍

中图分类号: TP393.02 **文献标志码:** A

Improved approach for cooperative obstacle-avoidance in mobile wireless sensor network

CHEN Zuo, WAN Xin*, TU Yuan-yuan, LI Ren-fa

(School of Information Science and Technology, Hunan University, Changsha Hunan 410082, China)

Abstract: Current research of the cooperative obstacle-avoidance tracing is based on traditional flocking control model which was proposed by Reynolds and implemented by Tanner. The authors improved it and added the Steer to Avoid obstacle avoidance method. This model has a high efficiency in avoiding convex obstacle in tracking target. If the method is applied to the environment of concave obstacles, nodes will stuck in the concave zone and could not get out, because the target has an attraction power to nodes when it comes to a Steer to Avoid judgment. This paper proposed a new model for concave obstacles by further improving the Steer to Avoid method. The attraction from the target was temporarily cancelled when it came to a concave environment judgment, and then the path was constantly searched along the edge of obstacles. Finally, nodes could get out of the concave obstacles and reach target. The simulation results show that the proposed model, while compared to the traditional model, has a marked increase on average rate and time efficiency in avoiding obstacle. Also, it can succeed in avoiding mobile concave obstacles in unknown environment.

Key words: mobile wireless sensor network; obstacle-avoidance; cooperation; flocking control; concave obstacle

0 引言

无线传感器网络作为微机电、通信和传感器三种技术相结合的产物, 已成为计算机与通信领域的一个研究热点。传统的无线传感器网络主要采用固定的传感节点收集数据, 无法满足未来微型、高移动的应用需求, 也无法满足某些需要移动节点的应用, 比如监测野生动物的活动、追踪病人的心跳情况等, 节点总是处于不断的运动中。因而通过增设一些功能更为强大且可移动的节点构成的移动传感网络已成为当前研究领域的一个热点, 并有着广阔的应用前景。基于移动传感器网络中节点的移动性, 使其在目标跟踪方面得到广泛应用。在军事、环境、医疗卫生、智能家庭等方面有很大的潜在应用价值, 尤其在无人监测或环境恶劣情况下的事件跟踪中显示了很大的优势。同时, 在商业方面也呈现称出很好的应用前景, 如办公建筑的环境控制、汽车防盗等。

用移动传感器来跟踪监测移动目标节点的一个主要难题

在于这些用于跟踪监测的传感器必须在移动监测过程中无碰撞, 这就要求我们采用群体协同控制方法。蜂拥控制方法是目前最热点的协同跟踪方法之一, 蜂拥是如下的一种现象^[1]: 众多传感器节点群体移动并相互通信的同时还确保无冲突、速度匹配以及向中心汇聚。然而在未知环境目标跟踪过程中, 遇到一些不明障碍物是不可避免的, 如何准确高效地避开障碍物同时也成了跟踪问题的一个关键所在。

然而, 在移动传感器节点跟踪的实际应用中, 节点所处的工作环境中, 有时障碍物的形状大小不一, 不仅存在凸形障碍物, 凹形障碍物也随处可见。由于凹形障碍存在各种巢穴, 在目标跟踪过程中, 移动节点群很容易陷入凹形巢穴, 这样严重影响跟踪效率, 甚至无法继续保持跟踪而脱离目标。

针对上述问题, 本文从凹形障碍物的特点出发, 对避障中使用到的 Steer to Avoid 法则^[2]做出改进, 提出一种新的避障模型。该模型在 Steer to Avoid 的避障过程中使节点能自行判断自己所处的凹形障碍环境, 取消目标对节点群的引力, 然后

收稿日期:2011-11-30;修回日期:2012-01-12。 基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(新教师)(20100161120021);湖南省自然科学基金资助项目(09JJ5045);湖南省科技计划重点项目(2010GK2002)。

作者简介:陈佐(1979-),男,湖南长沙人,讲师,博士,主要研究方向:计算机网络、数据挖掘、嵌入式系统、云计算; 万新(1989-),男,湖南岳阳人,硕士研究生,主要研究方向:无线传感网络; 涂员员(1986-),女,江西南昌人,硕士研究生,主要研究方向:无线传感网络; 李仁发(1957-),男,湖南宜章人,教授,博士生导师,主要研究方向:嵌入式计算结构、嵌入式网络(物联网)、无线通信、嵌入式软件、信息网络、虚拟与仿真。

沿着障碍的边缘不断搜索,最终找到凹形障碍的出口,最后再恢复节点群朝向目标的引力,使其适应于凹形障碍的环境中。

1 相关研究

在移动传感器网络目标跟踪问题的研究中,一个重要的研究内容是如何让群体达到协同,即在跟踪过程中使节点间既不碰撞又不分离,且速度处于匹配状态。在这个方面,蜂拥控制模型一直是研究的热点,它具有众多传感器在一起移动并相互通信的同时且无冲突、速度匹配以及向中心汇聚的优点。近年来,群体蜂拥控制理论在国内外得到了广泛研究。

1986年,Reynolds^[3]提出了一个在三维空间上用计算机来模拟群体行为的模型——Reynolds模型,该模型包括基本规则:1)分离,与邻域内的节点避免相撞;2)聚合,与邻域内的节点保持紧凑;3)速度匹配,与邻域内的节点速度保持一致。基于Reynolds模型,Tanner等^[4-6]考虑了一组具有双积分特性的群体系统,实现了Reynolds模型中的三种行为规则。在文献[4]中主要考虑个体的邻域始终保持不变的情况。文献[5]中则讨论了个体的邻域随时间变化的状况,也就是只有在个体一定范围内的节点才能对个体有作用,个体的输入控制由这个邻域内的节点所决定。文献[6]的主要工作是将前面的结果推广到有多个静态障碍物的环境中。群体在到达目标点的过程中协同避开障碍,并在某些情况下分成多个子组,到了目的点之后又重新聚合。文献[7-8]在Tanner模型的基础上进一步加入了“虚拟领导者”的概念,可以将虚拟领导者看成一个新的控制输入,它使群体能达到虚拟领导者所决定的速度,虚拟领导者也能够避免群体的分裂。

虽然蜂拥控制模型完成了群体的协同跟踪,但群体在目标跟踪过程中需要避开障碍物,所选的避障方法直接影响了群体在空间中运动的好坏。目前较受关注的避障方法是虚拟力避障方法^[9],其主要思想是当节点运动过程中在自己的感应范围内感应到障碍时,作用一个与自己到障碍点方向相反的力于节点上,使得节点无法靠近障碍物。这个力当节点靠近障碍时趋于无穷大,这保证了节点不会和障碍物发生碰撞。虚拟力的模型建立非常方便,但由于虚拟力与个体自身的力所抵消,这只能达到减速的目的,而没有采取积极措施进行转向判断,避障效率较低且可能陷入死局。与虚拟力避障法相比,Reynolds提到了Steer to Avoid的避障方法^[2]更具优势,这个避障方法有如下特点:1)个体只考虑在他前进方向上正对着的障碍物。2)在个体自身的坐标系工作,检测出障碍物离个体最近的边缘。3)得出障碍边缘的切线方向,作为个体转向的依据。Steer to Avoid避障方法让个体沿着障碍物的边缘运动,能让物体避开障碍物的效率得到很大的提高。

以上简单介绍了蜂拥控制模型和避障方法,那么针对在跟踪过程中避开凹形障碍物的方法,相关学者也作了一些研究,目前主要方法有人工势场法。

势场法^[10]是一种常见的机器人路径规划方法,其计算简单、易于实现,因而得到了广泛的应用。该方法通过在运动空间中引入一种虚拟受力场控制机器人的运动:目标点产生引力势场,障碍物则产生斥力势场,在合势场的作用下,若节点沿着势场的负梯度方向运动,将进入凹形障碍物内部,从而困于局部极小点而无法到达目标。

针对上述存在的缺陷,人们在寻找没有局部极小点的势场方面,做了很多有益的尝试:文献[11]提出了基于导航的人工势场中关于局部最小恢复的虚拟障碍概念,它把基于势

场的方法与虚拟障碍概念结合起来,在具有凹形障碍的环境下,有效地克服了局部极小等问题;但由于研究工作不足,设置虚拟障碍物大都是启发式的,缺乏严格的分析,算法验证也往往只基于仿真结果。文献[12]提出了进化人工势场法,它把遗传算法与人工势场法结合,推导出具有可调参数的最优势场函数,但由于计算量过大,导致不适合于实时应用。另外,在人工势场法基础上加入如最佳优先^[13]、模拟退火^[14]、随即搜索^[13,15]等搜索策略,寻找势场值比当前局部极小点更低的逃离点,然后继续沿着势场负梯度方法运动直到到达目标点或下一个局部极小点;但在缺少启发信息的情况下,搜索方法的效率可能很低^[13]。因此,在凹形障碍环境中应用人工势场法进行避障时,常常以失败告终。

目前对协同避障模型只是局限于障碍物为凸形的情况,但是在实际的情况下,障碍物的形状是无法预知的,现有协同避障模型虽然在凸形障碍物环境下有着较好的避障效率,但Steer to Avoid的判断是指向目标的,在这个封闭的空间里,节点群会做出多次Steer to Avoid转向判断。再加上目标对节点的引力,节点群的平均速率将会不断下降,导致了节点群陷入了无法绕出障碍的僵局。

针对基于凹形障碍物跟踪避障,在Tanner蜂拥模型与Steer to Avoid法则基础上进行改进,提出了一个基于凹形障碍物的协同避障方法。在此方法中,将协同避障模型引入凹形障碍的环境中,对现有的模型做出适当的改进,在Steer to Avoid的避障过程中取消目标对节点群的引力,让节点群在进入凹形后能自行地做出判断并沿着障碍物的边缘不断搜索路径,最终找到凹形障碍的出口,最后再恢复节点群朝向目标的引力,保持继续跟踪。

2 协同避障改进的模型

2.1 问题描述

在一个平面内有N个自治系统,每个自治系统没有大小(看成点)且质量为1。每个自治系统都装有传感器,所以可以把每个自治系统看成一个传感器节点,感应其他自治系统在平面中的位置、速度等信息,并假设感应角度为360°,感应范围为圆形。节点*i*的运动满足下面的两个方程:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{r}}_i = \mathbf{v}_i \\ \dot{\mathbf{v}}_i = \mathbf{u}_i \end{cases} \quad (1)$$

其中, $i=1,2,\dots,N$ 。 $\mathbf{r}_i=(x_i,y_i)^T$ 是节点*i*的位置向量, $\mathbf{v}_i=(\dot{x}_i,\dot{y}_i)^T$ 是节点*i*的速度向量,且节点*i*的速度与全局水平坐标轴的夹角定义为 $\tan\theta_i=\dot{x}_i/\dot{y}_i$, $\mathbf{u}_i=(\ddot{x}_i,\ddot{y}_i)^T$ 是节点的控制输入(加速度)。 $\mathbf{r}_{ij}=\mathbf{r}_i-\mathbf{r}_j$ 定义为节点*i*与节点*j*之间的距离。可以把控制输入定义为:

$$\mathbf{u}_i = \boldsymbol{\alpha}_i + \boldsymbol{\beta}_i + \boldsymbol{\gamma}_i \quad (2)$$

其中: $\boldsymbol{\alpha}_i$ 是速度匹配项,来实现Reynolds模型中的速度匹配的目标; $\boldsymbol{\beta}_i$ 是协同项,主要完成节点之间的碰撞避免和聚集,实现了Reynolds模型中的前两个目标; $\boldsymbol{\gamma}_i$ 是虚拟领导项,在运动的过程中能够产生一个远离障碍的斥力,避免节点与障碍之间的碰撞,同时使节点朝着预先给定的终点 $\mathbf{r}_d=(x_d,y_d)^T$ 运动。

笔者曾对协同避障模型做了研究,改进了Tanner的协同避障模型。文献[1]中只研究了障碍物是静止正方形的情况,文献[3]将协同避障的模型推广到了移动障碍物的环境下。但是在实际的情况下,障碍物的形状是无法预知的,改进的模型虽然在凸形的静止或移动的障碍物环境下有着较好的

避障效率,但在凹形障碍的环境下却会陷入僵局,节点群会卡在凹形障碍中。本文将协同避障模型引入凹形障碍的环境中,对现有的模型做出适当的改进,让节点群在进入凹形后能自行地做出判断并沿着障碍物的边缘不断搜索路径,最终绕出障碍到达目标。

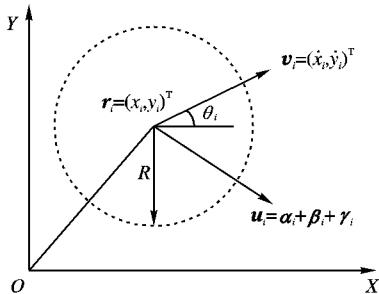


图 1 协同避障模型图示

2.2 模型的建立

邻域(感应范围):由于节点只能和自己邻近的节点通信,控制输入也主要通过这些信息获得。令 N_i 为节点 i 的邻域中的节点集(不包括 i 本身)。

$$\mathcal{N}_i \triangleq \{j \mid \|r_{ij}\| \leq R\} \subseteq \{1, 2, \dots, N\} \quad (3)$$

其中 R 是节点的感应半径。由于节点是运动的,每个节点之间的距离是不断变化的,这导致了每个节点的邻域也是不断变化的。

速度匹配项 α_i :目标是使节点 i 与邻域内其他节点的速度不断接近,直到所有节点速度相等。节点 i 和其邻域内所有速度向量相减,然后将这些差值叠加,得到一个综合的控制输入:

$$\alpha_i = - \sum_{j \in \mathcal{N}_i} (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j) \quad (4)$$

协同项 β_i :该控制输入的作用是使节点间距离太近时避免碰撞(斥力),节点间距离太远时又相互吸引(引力),超出感应半径 R 后不存在任何力的作用。邻域内的所有节点对节点 i 造成的控制输入的总和构成了控制输入 β_i 。令 i 的邻域内的 j 节点对 i 节点造成的避障聚合控制输入为 V_{ij} 。可定义 V_{ij} 为:

$$V_{ij} = \begin{cases} (r_{ij} - r)^n, & 0 < \|r_{ij}\| \leq R \\ 0, & \|r_{ij}\| > R \end{cases} \quad (5)$$

其中 $n = 1, 3, 5, \dots, 2k + 1$ 。在这一项的作用下,节点和节点间的距离会趋向于一个稳定值 r_* 。 n 为一个正的奇数,可以根据实际情况来设置。则可以得到协同项 β_i 为:

$$\beta_i = - \sum_{j=1, j \neq i}^N V_{ij} \quad (6)$$

虚拟领导项 γ_i :该项保证节点在避开障碍的情况下同时朝着预先给定的目标点运动。对于节点的运动分情况讨论:当节点在自己的感应范围内检测不到障碍物时,该项提供一个恒定的朝向目标的引力 $\mathbf{U}_i = \mathbf{U}_d$,使节点能够朝着目标运动。但是节点的速度不能无限地增加,会增加碰撞障碍的几率。当节点速度到达某个最大值时 v_{max} ,取消这一项的作用,当节点离目标非常近后 $\|r_{id}\| < r_{min}$,也取消这个引力,让节点能在目标处停下来;当在感应范围内检测到障碍物时,先取消这个引力,取障碍物离节点最近的一点 r_o ,施加一个与节点连线方向上的斥力 \mathbf{U}_i :

$$\mathbf{U}_i = - \mathbf{U}_o / (\|r_{io}\|)^m \quad (7)$$

其中: \mathbf{U}_o 为一个恒值, m 是一个正整数(按实际情况设置)。当节点与障碍离得非常近时,该项提供一个非常大的斥力,则节点的虚拟领导控制输入 $\gamma_i = \mathbf{U}_i$ 。

综上所述,节点 i 总的控制输入 \mathbf{u}_i 可以确定为:

$$\mathbf{u}_i = \begin{cases} - \sum_{j \in \mathcal{N}_i} (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j) - \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \mathbf{V}_{ij} - \mathbf{U}_i - k\mathbf{v}_i, & \|\mathbf{r}_{id}\| < r_{min} \\ - \sum_{j \in \mathcal{N}_i} (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j) - \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \mathbf{V}_{ij} - \mathbf{U}_i, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

其中:当节点与目标点的距离小于一个定值以后,可以看作节点已经到达目标,这时节点的速度应该下降,最终能在目标旁停止下来。所以当 $\|\mathbf{r}_{id}\| < r_{min}$ 时,为 \mathbf{u}_i 添加阻尼项 $-k\mathbf{v}_i$ 。

Tanner 的模型虽然实现了 Reynolds 的蜂拥控制模型,但是其在避障上的缺陷还比较大,需要引入一种有效的避障方法。Steer to Avoid 的避障方法能让节点在遇到障碍后沿着障碍的切线方向运动,明显提高了避障的效率。

将 Steer to Avoid 算法运用到避障中,在传感器节点检测到障碍的同时,计算节点速度方向直线与障碍边缘的交点的切线,作为节点转向的依据。切线是有两个方向的,必须要选择其中一个方向来转向。可以先任意选择一个方向,角度记为 σ_i (角度的大小都是相对于水平方向的)。将节点与目标点相连接,这条直线的角度记为 ξ_i ,这条直线势必与该切线相交。

$$\xi_i = \arctan((y_i - y_d)/(x_i - x_d)) \quad (9)$$

由于切线方向为转向后的速度方向,在选择节点的转向的方向时,需要选择能尽快到达目标的方向。若当前选择的方向 σ_i 假定为转向后的速度方向,将该速度投影到节点 i 与目标的连线上,可以得到一个朝向目标的速度分量。将以上两条直线的角度相减,若得到的结果小于等于 $\pi/2$ 时,该投影的速度分量是指向目标的,也就是速度方向是趋向于接近目标的,所以取 σ_i 为转向方向。如果两个角度相减得结果为钝角,则将 σ_i 减去 π ,然后将其作为转向角度。最后得到的转向角记为 φ_i 。如图 2 所示。

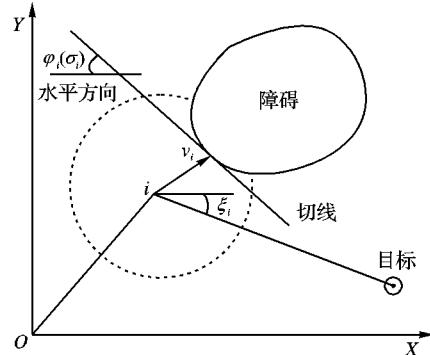


图 2 Steer to Avoid 避障方向选择

φ_i 的选择可以描述为:

$$\varphi_i = \begin{cases} \sigma_i, & |\sigma_i - \xi_i| \leq \pi/2 \\ \sigma_i - \pi, & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

在遇到障碍物的情况下,速度要能很快地改变为切线方向,否则可能因为速度太大而撞上障碍。所以,在障碍物下的 Steer to Avoid 避障方法的速度改变应该是瞬时的,速度方向瞬间从 θ_i 改变为 φ_i 。

可以把 Steer to Avoid 引入节点的跟踪过程中。在没有检测到障碍物的情况下,现在的模型只单独使用一个朝向目标的控制输入来吸引节点朝目标运动,速度方向的变化非常缓慢,使得追踪目标的效率明显下降。这里,将 Steer to Avoid 的避障方法同样引入节点的跟踪过程中,使得节点能够更快,走

更优化路径到达目标点。当节点在感应范围内检测不到障碍时(障碍的最近点在感应范围之外),节点会以自身与目标点的连线方向作为转向的方向。记为 η_i 。在跟踪目标的Steer to Avoid中,速度应该平滑地改变。这里定义一个恒定的角速度 ω ,速度方向以角速 ω 从 θ_i 平滑地转变为 η_i 。这一个转向法则和虚拟领导控制项共同作用于节点,使得节点能更优化地朝着目标运动。

将Steer to Avoid的法则加入协同避障模型中,使得节点群在避开障碍和追踪节点中的效率明显提高。另外,在避障的过程中,可能会有某些节点自身没有检测到障碍物,此时该节点的转向角度为null,但其邻域内已经有节点做出了转向的决定,那么该节点可以根据邻域内其他节点的转向角做出转向的决定。这可以在没有遇到障碍前就做出转向的决定,进一步提高了群体转向的效率。

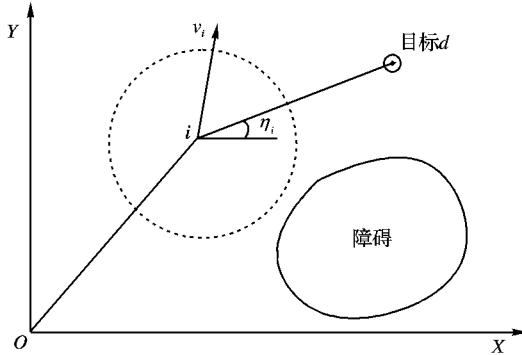


图3 Steer to Avoid在追踪目标上的使用

节点在做出转向的决定前,首先要看自己是否能检测到障碍物,如果能检测到障碍物并能根据Steer to Avoid避障方法来计算出转向角,则忽略邻域内其他节点的转向。若节点不能检测到障碍物,则检查邻域内所有节点的转向角,并求出所有转向角的平均角度,将该角度作为节点的转向角。可以描述为:

$$\varphi_i = \sum_{j \in N_i} \varphi_j / n; j \in N_i, \varphi_i = \text{null}, \varphi_j \neq \text{null} \quad (11)$$

其中邻域内有 n 个节点的转向角度不为null。

现有的模型在改进Tanner的协同避障模型的基础上加入Steer to Avoid的避障和追踪目标点的法则,能够避开环境中的凸形障碍物,且保证了一个较高的避障效率。但是在实际环境中,传感器节点群的运动环境总是很复杂的,不仅仅存在着静止或者移动的凸形障碍,同样存在着各种凹形障碍。现有的模型在遇到凹形障碍时,由于节点群感应范围的限制,一开始并不能检测出凹形障碍并做出转向判断。以下的改进从凹形障碍物的特点出发,在Steer to Avoid的避障过程中取消目标对节点群的引力,然后沿着障碍的边缘不断搜索,最终找到凹形障碍的出口,最后再恢复节点群朝向目标的引力。

如同2.2节中提到的,节点群是没办法在走入凹形障碍之前做出转向判断的。如图4所示,在节点群看来,前方并没有任何障碍,节点群会不知情地走入凹形障碍之中。在检测到障碍之后,节点仍然使用Steer to Avoid避障法则来避开障碍,根据前面的模型,Steer to Avoid的判断是指向目标的,在这个封闭的空间里,节点群会做出多次Steer to Avoid转向判断。再加上目标对节点的引力,节点群的平均速率将会不断下降,导致了节点群陷入了无法绕出障碍的僵局。

针对这种缺陷,我们要对前文提出来的模型加以改进。当节点群遇到一个障碍物时,局部的信息并不能让节点群做

出最优的判断。不论是凹形还是凸形的障碍,第一次的Steer to Avoid避障判断对于节点群来讲,都是一样的。对于凸形的障碍,朝向目标的牵引力在Steer to Avoid避障的过程中能使节点紧贴在障碍旁边而不至于被障碍弹开(弹开后,节点群检测不到障碍物,运动会恢复到指向的Steer to Avoid);对于凹形障碍,朝向目标的牵引力会干扰节点群之后的路径搜索。所以,在节点Steer to Avoid避障的过程中,取消这个对目标的吸引力。为了保证节点群不会被障碍弹开,增加一个朝向障碍的引力 U'_i :

$$U'_i = \begin{cases} U_o' \| r_{io} \|, & 0 < \| r_{io} \| \leq R \\ 0, & \| r_{io} \| > R \end{cases} \quad (12)$$

其中: U'_i 是一个定值,根据实际情况设置。 r_{io} 是障碍 O 上离节点 i 最近的点距离,这一项和式(7)共同作用在节点避障的过程中,保证了节点能够沿着障碍的边缘运动,并在感应范围内检测到障碍物。

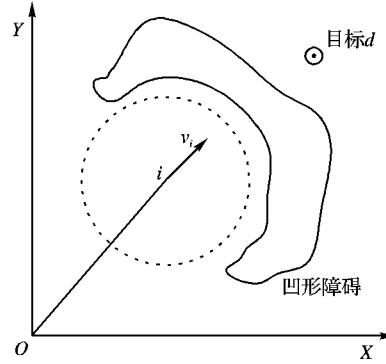


图4 节点进入凹形障碍

虽然节点群能组成一个较大的感应范围,但是毕竟节点群也只能接收到障碍物的局部信息。所以,在Steer to Avoid判断之后,要能使节点沿着障碍的边缘寻找路径,而不被目标影响。上文在Steer to Avoid避障判断的过程中,节点首先计算出切线的两个方向,然后按照与节点目标连线较小的夹角较小的方向来进行转向,这种方法在凸形障碍的环境下有着较好的避障效果。但是,当节点群进入凹形障碍以后,仍然使用这种指向目标优先的方法就会使节点陷入凹形之中无法脱身。这里对避障中使用到的Steer to Avoid法则做出改进,使其适应于凹形障碍的环境中,沿着障碍的边缘搜索,并最终绕出障碍。

在Steer to Avoid避障法则得到两个切线的角度时(式(10)中为 σ_i 与 $\sigma_i - \pi$),此时要选择一个切线方向来避开障碍,根据节点能够感应到的障碍的局部信息,可以分为以下3种情况。

1)两个切线方向上,节点都没有检测到障碍物。由于切线在感应范围的边缘,无法方便节点得到局部信息,这里将切线平移到节点 i 和切点 o 的中点处,来检测这条线是否与感应范围内的障碍有交点。如图5所示,由于节点在此时没有办法判断这个障碍物是否为凹形,仍然使用式(10)的优先目标方向的Steer to Avoid避障法则。可以用式(13)得到这条切线 l 的方程,其中 y_o, x_o 是速度方向与障碍的切点坐标:

$$Y - \frac{(y_i - y_o)}{2} = \sigma_i \left(X - \frac{(x_i - x_o)}{2} \right) \quad (13)$$

2)两个切线方向上,有一个方向感应到了障碍物。如图6所示,节点就能够判断自己是处在了凹形障碍之中了。为了不走重复路径,并让节点继续沿着障碍边缘的搜索,忽略节

点指向目标的 Steer to Avoid 判断。这里切线 l 与感应范围内的障碍边缘只有一个交点，选择前方没有障碍物的切线方向转向。

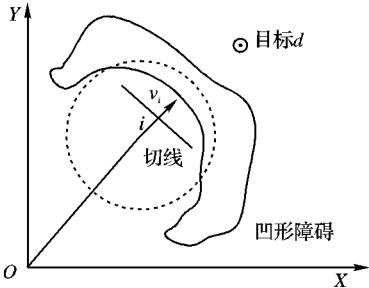


图5 两切线方向都没有障碍的 Steer to Avoid 改进

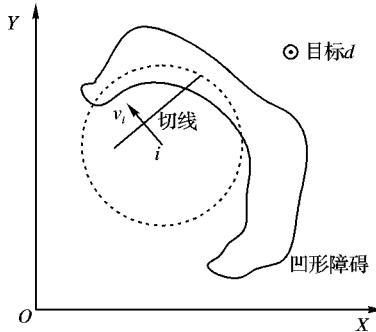


图6 单切线方向感应到障碍的 Steer to Avoid 改进

3)两个切线方向上都有障碍物。如图7所示,不论节点选择哪个方向都不能绕开障碍。同样忽略指向目标的 Steer to Avoid 判断。这里切线 l 与感应范围内的障碍物边缘有两个交点。此时将节点的速度反向,使节点退出凹形障碍。

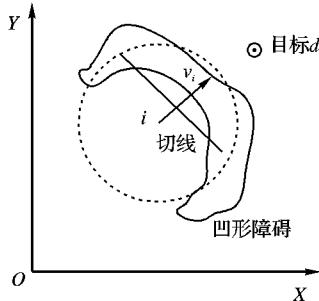


图7 双切线方向感应到障碍的 Steer to Avoid 优化

最终的转向方向 φ_i 可以描述为:

$$\varphi_i = \begin{cases} \sigma_i, & \text{切线 } l \text{ 仅在 } \sigma_i - \pi \text{ 方向与障碍边缘相交或} \\ & \text{切线 } l \text{ 与障碍边缘无交点且 } |\sigma_i - \xi_i| \leq \pi/2 \\ \sigma_i - \pi, & \text{切线 } l \text{ 仅在 } \sigma_i \text{ 方向与障碍边缘相交或} \\ & \text{切线 } l \text{ 与障碍边缘无交点且 } |\sigma_i - \xi_i| > \pi/2 \\ \theta_i - \pi, & \text{切线 } l \text{ 与障碍边缘有两个交点} \end{cases} \quad (14)$$

其中 θ_i 是节点在 Steer to Avoid 前的速度方向。在最后确定了节点的转向角度后,可以根据式(15)将速度向量改变为:

$$\begin{cases} v_x = \cos \varphi_i \sqrt{(v_x^2 + v_y^2)} \\ v_y = \sin \varphi_i \sqrt{(v_x^2 + v_y^2)} \end{cases} \quad (15)$$

通过以上的方法,节点能通过改进的 Steer to Avoid 避障方法不断沿着凹形障碍的边缘来搜索出路。而相互作用的障碍物的斥力和引力能让节点贴着障碍的边缘运动。当节点走出了凹形障碍时(节点检测不到障碍物),为了不让节点再次

陷入凹形障碍,记录离开障碍前最后一刻的 U'_i 的大小和方向,让其再作用一个 Δt 的时间,使节点彻底走出障碍, Δt 与节点的速度有关,可以描述为:

$$\Delta t_i = T / |v_i| \quad (16)$$

其中 T 为定值,根据实际情况设置。当节点速度快时, U'_i 维持较短的时间;当节点速度慢, U'_i 维持较长的时间。

在最终绕开凹形障碍后(Δt 时间后),恢复节点的朝向目标的引力,使用导向中的 Steer to Avoid 法则继续追踪目标。

通过以上的模型,传感器节点群能够组成一个稳定的群体朝着目标运动。运动中有一个持续朝着目标的引力,同时使用了转向中的 Steer to Avoid 来导航节点群。运动中碰到障碍物时,取消朝向目标的引力,通过 Steer to Avoid 避障方法让节点沿着障碍物切线的方向运动,提高避障效率。而当切线方向也检测到障碍时,节点就能判断自己已经陷入了凹形障碍,节点能将自己的速度调整到一个合理的方向上,沿着障碍的边缘搜索出口,并最终绕出凹形的障碍。

3 仿真实验与分析

第2章描述了针对凹形障碍的协同避障模型,仿真实验将对该模型在凹形障碍下的应用进行模拟,验证模型的有效性和稳定性。并对 Tanner 的蜂拥控制模型和笔者曾提出的协同避障模型进行对比分析。

仿真的检测范围为横轴1800、纵轴900的长方形区域。在横轴0到100,纵轴450到550的范围内初始10个传感器节点。所有节点的初始速度大小方向为任意值,初始控制输入为零。环境中设置一个凹形的线形障碍,由三根线段($x = 1000, 300 \leq y \leq 700; y = 300, 600 \leq x \leq 1000; y = 700, 600 \leq x \leq 1000$)组成。目标点的坐标为[1600, 450]。环境中的传感器节点群会协同地朝着目标前进,并尝试避开环境中的凹形障碍物。

本文用以下几个指标来衡量协同避障模型在凹形障碍环境下的优劣:

- 1)是否可以绕出凹形障碍:所使用的模型必须要能绕出凹形障碍,从而达到目标追踪的目的。
- 2)节点群的平均速率变化曲线:速率变化曲线清晰地记录了节点群在运动过程中的速率变化情况,可以用来衡量模型的避障效率。
- 3)到达目标所需的时间:若点群最终能够到达目标,所用时间较短的模型较优。
- 4)节点与目标的平均距离变化:该曲线能够判断节点群是否朝向目标运动,最终是否能够到达目标。

在使用 Tanner 的蜂拥控制模型来避开凹形障碍时,可以得到如图8所示的仿真图像。

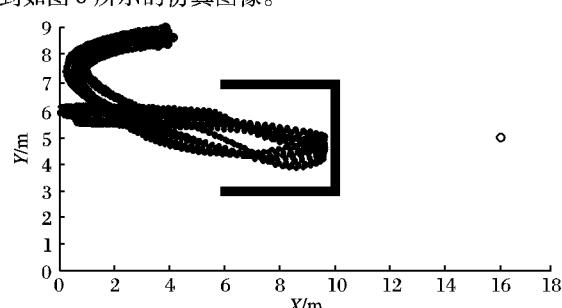


图8 应用 Tanner 的蜂拥控制模型避开环境中的凹形障碍

从图8可以看到,Tanner 的蜂拥控制模型在节点群碰到

障碍时只给节点施加了一个斥力,使节点群从障碍旁弹开。节点群在凹形障碍内经过了右边缘和下边缘的两次反弹,最后离开了凹形障碍。弹开后使节点速度方向再次朝向目标点是需要一个过程的,而且很可能再次进入凹形障碍中,这样使节点群的目标追踪陷入了死循环,永远无法到达目标点。节点群在运动中的速率变化如图9所示,图中横轴表示的是节点运动的时间,纵轴表示的是10个节点的平均速率。可以看到在障碍弹开节点的过程中的速率损耗较大,而使速度方向再次朝向目标也需要大幅度地减速,在150 s后节点群仍然没有到达目标。

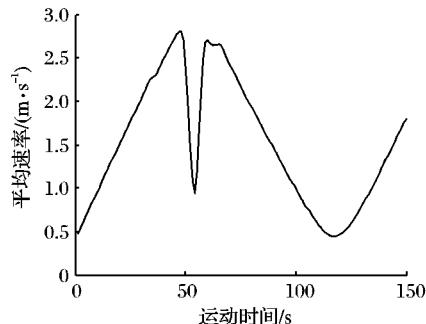


图9 应用Tanner的蜂拥控制模型的节点群的速率变化

笔者曾经对Tanner的模型做出了改进,加入了Steer to Avoid转向判断,且能在凸型障碍中保证较高的避障效率。将该模型应用到凹形障碍的环境中,可以得到的仿真图像如图10所示。

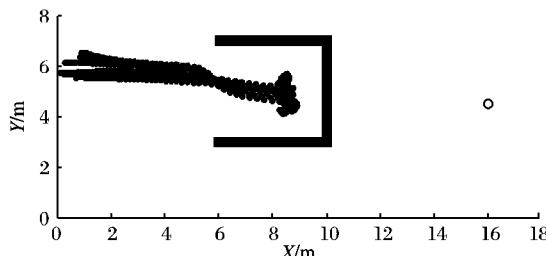


图10 加入Steer to Avoid的协同避障模型避开环境中的凹形障碍

从SteertoAvoid的模型得出,所有转向的判断都是优先于目标的点方向的。进入障碍后,节点群会做出多次转向判断,但是每一次的判断都不能让节点群绕开障碍,节点最终陷入了僵局。节点群在运动中的速率变化如图11所示,可以看到节点群在障碍中不断地做出转向判断,却无法绕出凹形障碍,平均速率同时不断降低。在150 s后节点群仍然没有到达目标。

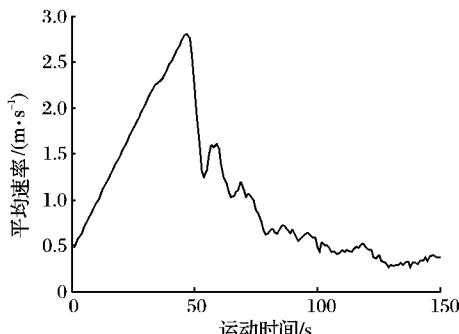


图11 加入Steer to Avoid的协同避障模型的节点群的速率变化

改进后的协同避障模型考虑到了环境中存在凹形障碍的因素。图12是改进后的模型在凹形障碍环境下的应用。

在第一次接近凹形障碍时,改进的模型和加入Steer to Avoid避障法则模型的转向判断是一样的。在第二次遇到障

碍时(接近下边缘),改进的模型通过感应的局部信息选择了一条合理的路径,障碍边缘的吸引力使节点群不断沿着障碍的边缘搜索,最终绕出了凹形障碍,到达目标。节点群在运动中的速率变化如图13所示,可以看到节点群只在转向时有一定的速率损失,这是可以接受的。绕开凹形障碍后,节点群借助导向中的Steer to Avoid很快修正了速度的方向,最终在150 s到达了目标周围。

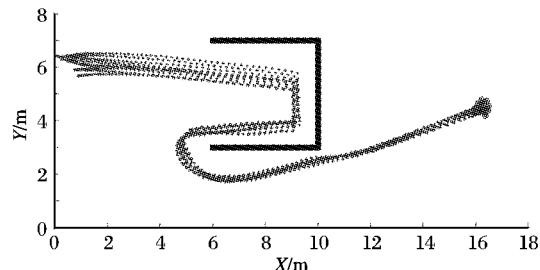


图12 改进后的协同避障模型避开环境中的凹形障碍

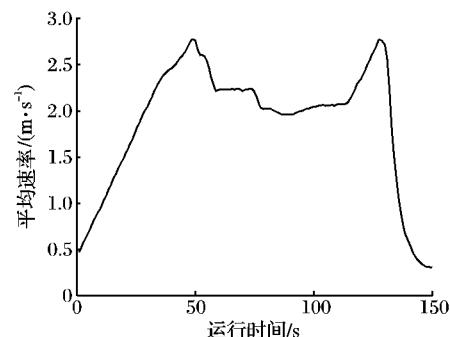


图13 改进后的协同避障模型的节点群的速率变化

节点与目标间的平均距离变化曲线如图14所示。其中虚线为Tanner的蜂拥控制模型的应用。在碰到障碍反弹后,节点群消耗了过多的时间修正速度方向来面向目标运动,退出凹形障碍后又多次陷入障碍。所以节点群与目标间的平均距离是不断下降又升高的,最终无法到达终点;带“*”号曲线部分是加入Steer to Avoid的协同避障模型的应用。在进入凹形障碍后,节点群根据Steer to Avoid做出了多次避障判断,但都是朝向目标的。节点群与目标的距离保持了一个定值,可以推断此时节点群已经陷入凹形障碍不能动弹,最后也没有到达终点;带“x”号曲线部分是改进后的协同避障模型的应用,两次避障判断后,节点已经能够判断自己处在了凹形障碍中。虽然在沿着凹形障碍边缘搜索时取消了朝向目标的引力,使得节点群暂时远离节点,成功绕开障碍后,由于有转向中的Steer to Avoid的作用,节点群的速度很快得到了修正,最终到达了目标。

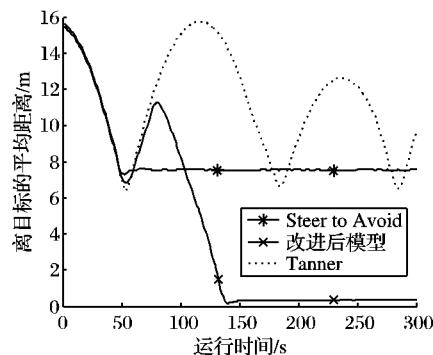


图14 三种模型的节点与目标间平均距离变化曲线对比

综上所述,前两种模型在避开凹形障碍时都有弊端,节点

群可能永远无法到达目标周围。而改进后的模型考虑到了环境中的凹形障碍的因素,沿着障碍边缘不断搜索,最终很快绕开了凹形障碍到达目标,速率的损失较小,整体的避障效率很高。

4 结语

根据 Reynolds 提出的蜂拥控制,在 Tanner 的蜂拥控制与 Steer to Avoid 避障法则基础上,本文提出了一个新的集群协同避障模型。该模型,在 Steer to Avoid 的避障过程中取消目标对节点群的引力,让节点群在进入凹形后能自行地做出判断并沿着障碍物的边缘不断搜索路径,最终找到凹形障碍的出口,最后再恢复节点群朝向目标的引力,保持继续跟踪。使得该模型在群体协同避障的过程中能够高效地避开凹形障碍物。对于如何避开移动中的凹形障碍物,甚至更复杂的环境,还需要作进一步的研究。

参考文献:

- [1] 陈世明. 群体系统蜂拥控制理论及应用研究进展[J]. 计算机应用研究, 2009, 26(6): 2004–2007.
- [2] Reynolds engineering and design. Obstacle avoidance steering behavior[EB/OL]. [2011-10-20]. <http://www.red3d.com/cwr/steer/Obstacle.html>
- [3] REYNOLDS C W. Flocks, herds, and schools: A distributed behavioral model[J]. Computer Graphics, 1987, 21(4): 25–34.
- [4] TANNER H G, JADBABAIE A, PAPPAS G J. Stable flocking of mobile agents, Part I: Fixed topology[C]// Proceeding of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control. Piscataway: IEEE Press, 2003: 2010–2015.
- [5] TANNER H G, JADBABAIE A, PAPPAS G J. Stable flocking of mobile Agents, Part II: Dynamic topology[C]// Proceedings of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control. Piscataway: IEEE Press, 2003: 2016–2021.
- [6] TANNER H G. Flocking with obstacle avoidance in switching networks of interconnected vehicles[C]// Proceeding of IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway: IEEE

Press, 2005: 3006–3011.

- [7] TANNER H G, JADBABAIE A, PAPPAS G J. Flocking in fixed and switching networks[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2007, 52(5): 863–868.
- [8] SHI HONG, WANG LONG, CHU TIANGUAN. Virtual leader approach to coordinated control of multiple mobile Agents with asymmetric interactions[J]. Physica D, 2006, 213(1): 51–65.
- [9] 李春菊, 陈文瑛. 基于虚拟力场法的移动机器人避障研究[J]. 机电产品开发与创新, 2009, 22(3): 22–23.
- [10] KHATIB O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robot[J]. International Journal of Robotics Research, 1986, 5(1): 90–98.
- [11] LIU C Q, MARCELO H J, KRISHNAN H, et al. Virtual obstacle concept for local minimum recovery in potential-field based navigation[C]// Proceeding of the 2000 IEEE International Conference on Robotics & Automation. Piscataway: IEEE Press, 2000: 983–988.
- [12] VADAKKEPAT P K, TAN C, WANG M L. Evolutionary artificial potential fields and their application in real time robot path planning[C]// Proceedings of the 2000 IEEE Congress on Evolutionary Computation. Piscataway: IEEE Press, 2000: 256–263.
- [13] BARRAQUAND J, LANGOLIS B, LATOMBE J C. Numerical potential field techniques for robot path planning[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1992, 22(2): 224–241.
- [14] JANABI-SHARIFI F, VINKE D. Integration of the artificial potential field approach with simulated annealing for robot path planning[C]// Proceedings of the 1993 IEEE International Symposium on Intelligent Control. Piscataway: IEEE Press, 1993: 536–541.
- [15] CASELLI S, REGGIANI M, ROCCHI R. Heuristic methods for randomized path planning in potential fields[C]// Proceedings of the IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation. Piscataway: IEEE Press, 2001: 426–431.

(上接第 1505 页)

4 结语

本文提出的利用查表法快速完成预编码处理的优化算法,有效解决了常规方法必须进行复数矩阵相乘的问题。此算法在 LTE 预编码的模式 3、4 中能很好地起到节省硬件资源和缩短处理时间的作用;也可应用此算法对系统进行优化,针对每个下行物理信道的预编码环节分时调用此模块,达到节省整个系统硬件资源的目的。

参考文献:

- [1] ANDREWA J G, CHOI W, HEATH R W. Overcoming interference in spatial multiplexing MIMO cellular networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2007, 14(6): 95–104.
- [2] LOVE D J, HEATH R W, Jr. Limited feedback unitary precoding for spatial multiplexing systems[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2005, 51(8): 2967–2976.
- [3] 3GPP TS 36.211, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA): Physical channels and modulation[S], 2009.
- [4] LOVE D J, HEATH R W, Jr, SANTIPACH W, et al. What is the value of limited feedback for MIMO channels?[J]. IEEE Communications Magazine, 2004, 42(10): 54–59.
- [5] 3GPP TS 36.212, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-

UTRA): Multiplexing and channel coding [S], 2009.

- [6] 3GPP TS 36.213, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA): Physical layer procedures[S], 2009.
- [7] DAHLMAN E, PARKVALL S, SKÖLD J. 3G 演进: HSPA 与 LTE [M]. 2 版. 堵久辉, 缪庆育, 徐斌, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2010.
- [8] DAHLMAN E, PARKVALL S, SKÖLD J. 4G LTE/LTE-advanced for mobile broadband[M]. Oxford: Elsevier, 2011: 59–77.
- [9] 罗元钎. 多用户 MIMO 及中继通信网络中的预编码研究与 FPGA 实现[D]. 南京: 东南大学, 2008.
- [10] 袁超. LTE 下行预编码研究及 DSP 实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2010.
- [11] ABBAS S S A, SHEeba P A J, THIRUVENGADAM S J. Design of downlink PDSCH architecture for LTE using FPGA[C]// 2011 International Conference on Recent Trends in Information Technology. Piscataway: IEEE Press, 2011: 945–952.
- [12] ABBAS S S A, PRABA R L, THIRUVENGADAM S J. PCFICH channel design for LTE using FPGA[C]// 2011 International Conference on Recent Trends in Information Technology. Piscataway: IEEE Press, 2011: 58–63.
- [13] 夏宇闻. Verilog 数字系统设计教程 [M]. 2 版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008: 130–191.