

视觉传感器网络兼顾区域覆盖的目标多重覆盖*

向辉, 彭力, 刘刚, 唐从飞

(江南大学物联网工程学院, 江苏无锡214122)

摘要: 针对目前无线传感器网络覆盖研究中单纯进行区域覆盖或目标覆盖而将两者分立的情形, 提出了一种视觉传感网络混合覆盖算法。该算法基于有向感知模型, 利用虚拟势场使节点在待监测区域自组织地进行位置移动和感知方向转变, 在完成对覆盖质量要求较高的热点目标多重、优先覆盖的同时最大程度地覆盖整个待监测区域。仿真实验表明, 该算法自组织能力良好, 能有效满足热点目标和整个待监测区域对覆盖质量的要求, 有效地利用了网络资源。

关键词: 视觉传感器网络; 区域覆盖; 目标多重覆盖; 虚拟势场; 质心

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)09-3428-04

doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2012.09.061

Multiple target coverage considering area coverage in visual sensor networks

XIANG Hui, PENG Li, LIU Gang, TANG Cong-fei

(School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi Jiangsu 214122, China)

Abstract: To deal with the separate situation of research on area coverage or target coverage in wireless sensor networks, this paper presented a mixed algorithm for VSN. Based on directional sensing model, the algorithm used the virtual potential field to make the sensor nodes shift positions and change directions automatically in monitoring area. With the completion of multiple prior coverage of hot targets which needed higher quality requirements, the algorithm could maximize the coverage rate throughout the monitoring area. Simulation experiments show that the algorithm has a good ability of self-organizing. It can satisfy the requirements of coverage quality of the hot targets and the whole monitoring area and save resources effectively of the network.

Key words: VSN; area coverage; multiple target coverage; virtual potential field; center of mass

随着通信技术和传感技术的进一步发展, 无线传感器网络的应用越来越受到人们的高度重视, 其广泛性和多样性的特点使其在军事和民用领域中均有着非常广阔的应用前景^[1,2]。覆盖控制是无线传感器网络中研究和应用的关键性基础问题, 它通过利用传感器节点的空间位置分布实现对被监测区域或目标的信息感知。

近年来, 在传统的基于全向感知模型的传感器网络覆盖控制方面已取得了很多研究成果。然而随着新型视觉传感器网络的出现, 由于受到视觉节点感知方向的限制和媒体数据量巨大等因素的影响, 很多传统的覆盖算法已不能适用^[3]。因此, 针对视觉传感器网络需要进一步研究相应的覆盖控制策略, 以满足网络对于覆盖质量的要求。

1 相关工作

在学术界, 已有学者致力于视觉传感器网络覆盖方面的研究工作。文献[4]首先提出有向感知模型的概念, 研究了视觉传感器网络覆盖的完整性和连通性; 文献[5]提出了一种路径覆盖增强算法, 节点通过自调整传感方向, 实现对待监测区域覆盖的最大化; 文献[6]研究了在生命时间受约束的情况下最小化覆盖间隙问题和在覆盖间隙受约束的条件下最大化网络生命时间问题; 文献[7]针对大物体目标提出一个种多节点协

作覆盖算法, 利用虚拟力和粒子群算法实现多节点对目标点的覆盖; 文献[8]为实现各节点方向的最优调度, 提出了一种贪心算法以实现对区域覆盖的最大化。

在目前现有的视觉传感器网络覆盖研究中, 覆盖算法仅针对目标覆盖或区域覆盖独立设计, 并未兼顾目标和区域的混合覆盖。而在实际应用场景中, 往往需要在对目标监测的同时保证对整个区域的覆盖; 同时, 网络中不同的目标往往需求的覆盖质量也有所不同。在现有的网络覆盖研究中, 大部分算法仅限于监测到目标而已, 并没有考虑目标对于覆盖质量的要求, 在实际应用场景中, 对于网络中的热点目标, 需要更多的覆盖重数来保证对其监控的准确性及全面性。

针对这些问题, 本文提出了一种视觉传感器网络同时进行区域覆盖和目标多重覆盖的混合控制算法 MTCAC (multiple target coverage considering area coverage), 在节点有向感知模型的基础上利用虚拟势场自组织视觉节点, 在优先满足多个热点目标不同覆盖质量要求的同时最大程度地覆盖整个待监测区域。

2 感知模型及问题描述

在视觉传感器网络中, 节点的感知方向由于受到视野的限制, 因此不同于传统传感器节点的圆形感知区域, 其监测区域是一个以节点为圆心、半径为感知距离的扇形区域, 该扇形区

收稿日期: 2011-12-02; **修回日期:** 2012-01-29 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(60973095)

作者简介: 向辉(1986-), 男, 湖北广水人, 硕士研究生, 主要研究方向为无线传感器网络覆盖、智能算法(xianghui0501@126.com); 彭力(1967-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为无线传感器网络、机器视觉; 刘刚(1985-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为无线传感器网络定位与跟踪; 唐从飞(1988-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为机器视觉。

域可以绕圆心切换到不同的方向,并且每个方向只可感知有限的范围^[9]。如图1所示,用一个四元组 $(s_i, r_i, V_i, \theta_i)$ 表示节点 s_i 的感知模型,其中, $s_i = (x_i, y_i)$ 为节点 s_i 的位置坐标; r_i 为其有效感知半径; V_i 为其主感知方向; $2\theta_i$ 表示最大感知角度。

在网络工作阶段,随着节点的位置移动和方向转变,若目标点 t_m 与节点 s_i 满足以下两个约束条件:a)节点 s_i 到目标点 t_m 的欧式距离 $\|s_i t_m\| \leq r_i$;b) $s_i t_m$ 与 V_i 夹角取值为 $[-\theta, \theta]$,则称目标点 t_m 被节点 s_i 覆盖;若某个热点目标 t_m 同时被 k 个节点覆盖,则称该目标被 k 重覆盖。

为便于分析,本文的研究基于以下基本假设:

- 所有节点同构,即具有相同的感知半径、角度和通信半径;
- 节点在完成初始覆盖后位置可移动且感知方向可调;
- 节点通过某定位算法已获知自身位置信息;
- 节点的受力点为其自身和扇形感知区域的质心,其中节点自身受力使其位置发生移动,质心受力使其感知方向发生改变。

3 受力分析

MTCAC算法引入虚拟势场,使传感器节点在力的作用下自组织地进行位置移动和方向调整,完成对热点目标多重覆盖的同时最大效率地兼顾区域覆盖。

3.1 虚拟势场原理

虚拟势场的原理是把网络中每一个节点或目标看做一个虚拟的带电粒子,相邻粒子之间存在排斥力和吸引力两种相互作用力,如图2所示,其中 d_{ij} 为粒子 P_i 与 P_j 的距离。

当两粒子间距很近时,粒子间表现为排斥力,使两粒子相互远离;当两粒子间距很远时,粒子间表现为吸引力,使两粒子相互靠近。因此按照一定的规则设定粒子间作用力和距离之间的关系,在合力作用下移动粒子位置,可以有效避免粒子间距过密或过稀。本文将节点和热点目标类比为势场中的带电粒子,通过建立节点与节点、节点与目标间的虚拟力模型,根据圆心和质心的受力平衡确定各传感节点位置和感知方向来完成对热点和区域的覆盖。

3.2 节点自身受力分析

在节点自组织移动过程中,为方便计算,规定非邻居节点间主导的作用力为引力而忽略斥力的作用;邻居节点间斥力为主导作用力,同样忽略引力的作用^[5]。设 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ 为待监测区域中的节点集合,则节点 s_i 与 s_j 间的欧式距离可表示为 $d_{ij} = \|s_i - s_j\|$ ($1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n$); d_{th} 表示两节点间最佳距离,用来调整两节点间作用力的属性;节点 $s_i \sim s_j$ 的方位角用 α_{ij} 表示,通信半径均为 R ,则两节点间的作用力可表示为

$$F_{ij} = \begin{cases} (w_r (\frac{1}{d_{ij}} - \frac{1}{d_{th}}), \alpha_{ij} + \pi) & d_{ij} < d_{th} \\ 0 & d_{ij} = d_{th} \\ (w_a (d_{ij} - d_{th}), \alpha_{ij}) & d_{th} < d_{ij} < R \\ 0 & d_{ij} \geq R \end{cases} \quad (1)$$

其中: w_r 、 w_a 分别为节点间的斥力和引力系数,用于调节节点的疏密程度,一般由经验确定。

除了节点间具有相互作用力,对于待监测区域出现的热点目标,本文也将其类比为势场中的带电粒子,对节点同样有力的作用。设 $T = (t_1, t_2, \dots, t_m)$ 为热点目标点集合,则目标 t_p ($1 \leq p \leq m$)对节点 s_i 的作用力可表示为

$$F_{ip} = \begin{cases} 0 & d_{ip} < r \\ (w(d_{ip} - r), \alpha_{ip}) & r \leq d_{ip} \leq 2r \\ 0 & d_{ip} > 2r \end{cases} \quad (2)$$

其中: r 表示节点感知半径; d_{ip} 为目标 t_p 到节点 s_i 的欧氏距离; w 为目标对节点吸引力系数; α_{ip} 为节点 s_i 到热点 t_p 的方位角。由于热点目标的特殊性,因此本文不考虑其对节点的斥力作用。当 $d_{ip} > 2r$ 时,出于节点移动能耗的考虑,热点目标对节点的作用力为0。则对于节点 s_i ,其受到其他节点和热点目标作用力的合力为

$$F_i = \sum_{j=1, j \neq i}^k F_{ij} + \sum_{p=1}^m F_{ip} \quad (3)$$

其中: k 为节点 s_i 的邻居节点个数; m 为热点目标个数; F_i 的方向由 s_i 所受各虚拟力的矢量和的方向决定。

根据节点 s_i 受力,得到其运动学方程为

$$a_i = \frac{F_i - \mu v_i}{m} \quad (4)$$

其中: a_i 为节点 s_i 的加速度; v_i 为其速度; μ 为阻力系数; m 为节点质量。在完成初始布置后,节点在力的作用下开始自组织移动,但其速度不可能无限增大。当节点速度增加到最大阈值时,其速度不再增加,而是以此阈值速度作匀速运动。由此得出节点 s_i 在 x 和 y 方向上的位移表达式为

$$\Delta s x_i = \begin{cases} v_{ix} \times \Delta t + \frac{1}{2} \times a_{ix} \times \Delta t^2 & v_{ix} < v_{ix \max} \\ v_{ix} \times \Delta t & v_{ix} = v_{ix \max} \end{cases} \quad (5)$$

$$\Delta s y_i = \begin{cases} v_{iy} \times \Delta t + \frac{1}{2} \times a_{iy} \times \Delta t^2 & v_{iy} < v_{iy \max} \\ v_{iy} \times \Delta t & v_{iy} = v_{iy \max} \end{cases} \quad (6)$$

其中: v_{ix} 、 a_{ix} 和 v_{iy} 、 a_{iy} 分别为节点 s_i 在 x 和 y 方向上的速度和加速度; Δt 为时间步长。

因此,节点 s_i 更新后的位置表达式为

$$x_{i \text{ new}} = \begin{cases} x_{i \text{ old}} & |F_{ix}| \leq F_{th} \\ x_{i \text{ old}} + \Delta s x_i & |F_{ix}| > F_{th} \end{cases} \quad (7)$$

$$y_{i \text{ new}} = \begin{cases} y_{i \text{ old}} & |F_{iy}| \leq F_{th} \\ y_{i \text{ old}} + \Delta s y_i & |F_{iy}| > F_{th} \end{cases} \quad (8)$$

其中: F_{ix} 、 F_{iy} 分别为节点 s_i 所受合力在 x 和 y 方向上的分量; F_{th} 为预设虚拟力阈值。

3.3 感知区域质心受力分析

对于节点有向感知模型,其传感方向的不断调整可以看做扇形感知区域的质点绕节点作圆周运动。质心点位于扇形感知区域的对称轴上,与圆心的距离为 $2r \sin \theta / \sin 3\theta$ 处^[5] (r 为感知半径, θ 为感知角度的一半)。本文将质心类比为虚拟势场中的带电粒子,其受力使得节点的感知方向进行调整。

由于只有当两节点互为邻居节点时才有可能出现覆盖冗余,故本文对于节点间质心受力仅采用斥力模型。受力模型为

$$H_{ij} = \begin{cases} \left(\frac{w_0}{l_{ij}^2}, \varphi_{ij} \right) & O_j \in L_i \\ 0 & \text{others} \end{cases} \quad (9)$$

其中: l_{ij} 为质心 $O_i \sim O_j$ 的欧式距离; w_0 表示斥力系数; φ_{ij} 为质心 O_j 指向 O_i 的单位向量,指示斥力的方向; L_i 为节点 s_i 的邻居节点集。

故得质心 O_i 所受合力为

$$H_i = \begin{cases} \sum_{j=1, j \neq i}^k H_{ij} & 1 \leq k \leq n \\ 0 & k = 0 \end{cases} \quad (10)$$

节点质心间斥力使得节点在待监测区域自组织调整方向,

并且最大程度地覆盖区域,避免出现覆盖冗余。

对于待监测区域出现的热点目标,对质心同样有力的作用,该力为引力,使相应节点感知方向发生改变以实现热点目标的覆盖。本文中,设热点目标 t_p 仅对与其距离 d_{ip} 小于节点感知半径 r 的质心存在吸引力,引力模型为

$$H_{ip} = \begin{cases} \left(\frac{w_i}{l_{ip}^2}, \varphi_{ip} \right) & 0 \leq d_{ip} \leq r \\ 0 & d_{ip} > r \end{cases} \quad (11)$$

其中: l_{ip} 为质心 O_i 到热点目标 t_p 的欧式距离; w_i 为引力系数; φ_{ip} 为 t_p 指向 O_i 的单位向量。节点 s_i 根据质心 O_i 受力调整感知方向对目标 t_m 进行覆盖,如图 3 所示。

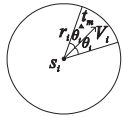
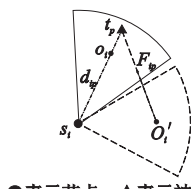


图1 视觉节点感知模型



图2 粒子间虚拟势场力示意图



●表示节点 ▲表示被覆盖目标

图3 目标覆盖示意图

4 算法描述

MTCAC 算法要求节点在待监测区域完成初始布置后,根据热点目标要求的覆盖重数对其进行优先覆盖,然后完成区域覆盖。

算法执行时,各节点根据自身受力快速自展开均匀布置在待监测区域,网络判断各热点目标是否满足预设覆盖要求。

情形 1 如果各热点目标的覆盖重数已满足要求,则其对节点不具备力的作用,其他节点根据质心受力转动感知方向,完成区域覆盖。

情形 2 如果某热点目标未达到预设覆盖重数,首先判断其需要补充的覆盖重数 N_A 和在其附近(距离小于节点感知半径 r) 是否有数目足够的节点(至少为 N_A)。若有,则热点目标对质心施加引力,调度需要转动角度最小的 N_A 个节点的感知方向完成对自身覆盖,然后其他节点根据质心受力自组织转动感知方向完成区域覆盖;若该热点目标附近没有数量足够的节点,而只有 N_B 个节点($0 \leq N_B < N_A$),则根据式(2)对离该热点距离在 $r \leq d_{ip} \leq 2r$ 内且离自身最近的($N_A - N_B$)个节点施加引力,使节点移动到其周围,然后再根据式(11)对该 N_A 个节点感知区域的质心施加引力,使感知方向改变完成覆盖;若所有热点满足覆盖重数要求,其余节点便对区域进行覆盖。

算法流程如图 4 所示。

5 仿真实验

为验证算法性能,在一个 20×20 的矩形待监测区域中随机生成三个热点目标,预设其需要覆盖的重数分别为 3、2、3,在 MATLAB 7.0 环境下进行仿真。

5.1 算法有效性

分别用 60、35 个半径 $r=3$,感知角度 $2\theta = \frac{\pi}{2}$ 的节点对待监测区域和热点目标进行覆盖。首先在待监测区域随机产生 60 个节点,图 5(a) 显示完成初始布置后,节点分布极不均匀,某些区域覆盖过密或过疏,整个网络覆盖率仅为 44.66%,3 个热点目标分别被 2、1、1 个节点覆盖。算法执行初始阶段,各节点受力展开,3 个热点目标分别被 2、2、2 重覆盖,节点 1 和 3 不

满足预设覆盖要求。当算法执行完成后,3 个热点分别被 3、2、3 重覆盖,满足覆盖要求,且监测区域内节点布置均匀,网络覆盖率增大至 83.76%,在满足热点覆盖重数的要求下,最大化了网络覆盖率,如图 5(b) 所示(图中五角星分别表示热点目标 1、2、3,下同)。

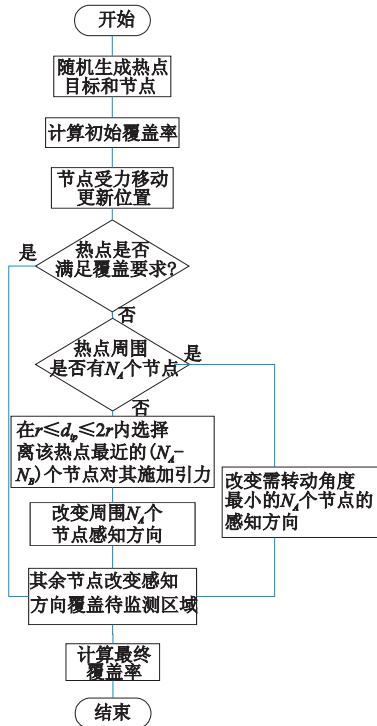


图4 算法流程图

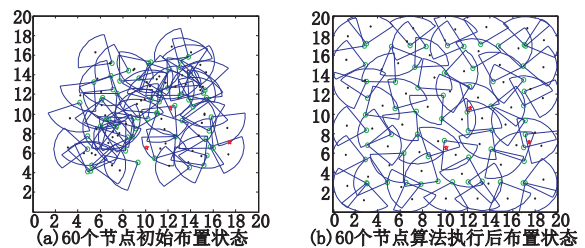


图5 节点布置状态

图 5 在节点相对充足、基本可以覆盖整个待监测区域的情形下验证了算法的有效性。当减少节点数量,用 35 个节点实验时,由于节点数量较少,不足以覆盖整个待监测区域,但算法执行后,网络仍然能满足各热点目标预设的覆盖重数要求,同时节点位置和质心分布均匀,覆盖率从 38.86% 提高到 58.1%,在节点数量受限的条件下仍然能在满足热点目标覆盖重数的前提下最大化整个区域的覆盖率,如图 6 所示。

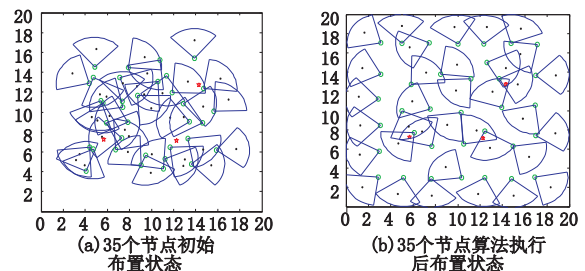


图6 节点布置状态

5.2 网络抗扰性

覆盖率反映了被监测区域的覆盖质量。由于网络中的节点初始位置是随机产生的,故每次实验经算法执行后的网络覆盖率也有所不同。在其他参数相同的情况下,对节点数量 $N =$

60,35 分别进行 10 次实验,在满足热点目标优先覆盖的前提下,得到网络覆盖率变化曲线,如图 7 所示。

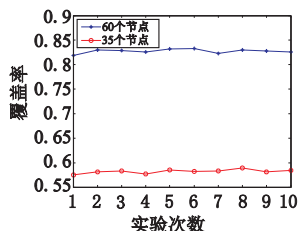


图7 节点在不同初始位置时的网络覆盖率

实验结果表明,对于不同数量的节点,MTCAC 算法执行后,网络覆盖率波动平缓,受节点初始位置影响很小,即网络受不确定扰动因素的影响小,表明 MTCAC 算法具有较好的抗扰性。

5.3 参数对覆盖率的影响

本文针对不同节点数量、传感半径、感知角度对算法进行仿真实验,在完成对热点目标的覆盖后,讨论其对区域覆盖率的影响。实验结果如图 8 所示。

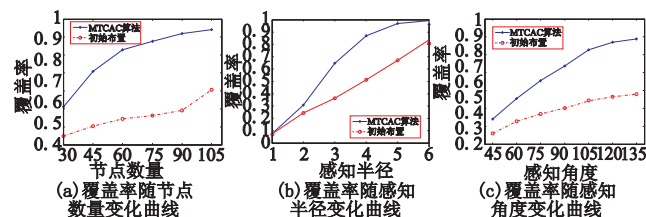


图8 实验结果

1) 节点数量对覆盖率的影响 ($r = 3; 2\theta = \frac{\pi}{2}; N = 30, 45, 60, 75, 90, 105$)。

2) 感知半径对覆盖率的影响 ($N = 40; 2\theta = \frac{\pi}{2}; r = 1, 2, 3, 4, 5, 6$)。

3) 感知角度对覆盖率的影响 ($N = 40; r = 3; 2\theta = \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{3}, \frac{\pi}{2}, \frac{7\pi}{12}, \frac{2\pi}{3}, \frac{3\pi}{4}$)。

实验结果显示,算法对于节点自身参数的变化较为敏感,在参数由小变大的过程中,覆盖率逐渐增大;但当参数增大

到一定程度时,曲线斜率变小,网络覆盖率增大的程度变小。这是由于当参数增大时网络覆盖冗余增多,导致网络覆盖的效率变低,由此可指导对节点参数的选取。

6 结束语

本文针对无线视觉传感器网络热点目标和区域混合覆盖问题,提出了一种兼顾区域覆盖的热点目标多重覆盖算法 MTCAC。该算法通过虚拟势场首先完成对覆盖质量要求较高的热点目标的多重优先覆盖,然后最大程度地覆盖整个待监测区域。仿真实验在不同节点数目下对算法的有效性和抗扰性进行了验证,同时讨论了节点数量和参数的选取对算法的影响。

参考文献:

- [1] HOUAIDIA C, IDOUDI H, SAIDANE L A. Improving connectivity and coverage of wireless sensor networks using mobile robots [C]// Proc of IEEE Symposium on Computers & Informatics. 2011: 454-459.
- [2] 洪锋,褚红伟,金宗科,等. 无线传感器网络应用系统最新进展综述 [J]. 计算机研究与发展, 2010, 47(2): 81-87.
- [3] 陶丹. 视频传感器网络覆盖控制及协作处理方法研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2007.
- [4] MA Hua-dong, LIU Yong-he. On coverage problems of directional sensor networks [C]//Proc of International Conference on Mobile Ad hoc and Sensor Networks. 2005: 721-731.
- [5] 陶丹,马华东,刘亮. 视频传感器网络中路径覆盖增强算法研究 [J]. 电子学报, 2008, 36(7): 191-196.
- [6] 杨辉强,李德,李政. 定向传感器网络中的最小化覆盖间隙和最大化网络生命时间问题的研究 [J]. 电子学报, 2010, 38(2): 138-142.
- [7] 赵龙,彭力,王茂海. 动态视觉传感器网络多节点协作覆盖算法 [J]. 计算机工程, 2011, 37(2): 108-110.
- [8] LIANG C K, TSAI C H, HE M C. On area coverage problems in directional sensor networks [C]//Proc of International Conference on Information Networking. 2011: 182-187.
- [9] 彭玉旭,张贤凤. 有向传感器网络覆盖增强研究 [J]. 计算机工程, 2011, 37(2): 100-104.