

## 信息扩散在无线传感器网络中的应用

魏嵬<sup>1</sup>, 张亮<sup>2</sup>, 郭得科<sup>3</sup>, 沈沛意<sup>2</sup>

(1. 西安理工大学 计算机科学与工程学院, 陕西 西安 710048;

2. 西安电子科技大学 软件学院, 陕西 西安 710071; 3. 国防科学技术大学 信息系统与管理学院, 湖南 长沙 410073)

**摘 要:** 首先假定在一个动态、实时的大型楼宇式停车场环境中, 使用无线传感器网来支持信息查询和导航系统。基于扩散方程和泊松公式, 提出一种新颖的信息查询和导航方法, 该方法能够更便捷、有效地完成导航系统进程。从信息导航理论研究的角度来分析, 一般假定研究工作的环境是理想状态, 受到很少的限制, 同时假定实际中一些错误的导航进程可以得到更正。为了达到导航系统的精确性, 首次应用了信息传播、电势场以及偏微分方程(扩散方程)的相关知识, 同时将梯度下降法应用于该算法。在研究过程中, 采用了完整的数学推导。模拟实验表明, 该方法准确方便, 并且高效地克服了典型传感器网络配置信息导航系统最优解较难快速获得和存在竞争冲突的弱点。同时, 扩散方程的结构也更具灵活性和适应性。导航性能也有较大提高, 还可避免甚至消除竞争冲突。另外, 热扩散方程的灵活使用克服了原有调和函数方法强约束的缺点, 取得了模型降阶的效果。

**关键词:** 无线传感网; 信息场; 扩散方程; 变分模型

中图分类号: TP393

文献标识码: B

文章编号: 1000-436X(2012)Z2-0146-07

## Applications of information navigation method in wireless sensor networks

WEI Wei<sup>1</sup>, ZHANG Liang<sup>2</sup>, GUO De-ke<sup>3</sup>, SHEN Pei-yi<sup>2</sup>

(1. School of Computer Science and Technology, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. National School of Software, Xidian University, Xi'an 710071, China;

3. School of Information System and Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** For adapting to a novel architecture of WSNs, which supports information query and navigation systems through construction of the virtual potential field. Under the premise of diffusion equation and poisson-based formula, a novel method was proposed which can accomplish the navigation more conveniently and more efficiently. In order to guarantee the accuracy of navigation, the relative knowledge of information transmission and the partial differential process (diffusion equation) in electric potential field was utilized, meanwhile gradient descent method was also applied in the process of application. A complete mathematical derivation was used. Tiny-OS simulations show the method can efficiently overcome the original WSNs weakness that network configuration abilities of information navigation are not good enough. Simultaneously, during the process of explore the navigation computation, structures of diffusion equation are more flexible and adaptability.

**Key words:** wireless sensor networks; information field; diffusion equation; variation model

收稿日期: 2012-10-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61072105, 60903206)

**Foundation Item:** The National Natural Science Foundation of China(61072105, 60903206)

## 1 引言

在实际的停车场中, 在(空闲/占用)停车场位集中的条件下, 即一种理想状况时, 客户可以迅速到达自己的目的地。在其他类似的场景中, 也需要考虑同样的需求。这是一个导航方面的问题, 可以通过许多方法和技术解决这些问题。在过去几十年中有大量的相关研究<sup>[1,2]</sup>。

一般客户的具体需求主要关注空车位的数量多少。如果只有一个客户和信息(如停车场位等)分布没有变化时, 很容易解决这个问题。但是, 一般而言, 随着客户群体的增加竞争也会加剧。在客户到达目的的过程中信息的分布可以呈动态的变化。因此, 还有待考虑信息分布的动态变化和采取一些措施来减少或者避免竞争。然而, 在以往的研究中, 对它缺乏足够的重视。

基于此目的, 可以有效、便捷地将汽车引导到停车场的空位置上(在处于拥有大量信息的场位)。一个相关的畅通信息电势场可望帮助完成导航系统。文献[2]中提出了一种新的方法, 电势场被假设为一个调和函数, 这样每个节点上都有一个准确的值。如果负载平衡被打破的话, 它可以在任何一个区域而非全球区域范围内都能运转得很好。在物理世界中, 扩散方程<sup>[3,12-19]</sup>代表材料的扩散过程。例如, 当把墨水放进纯净水中时, 可以通过几个参数方程式, 计算出墨水在任何一处的扩散规律和速度。

在不同的学科领域中, 扩散方程起着至关重要的作用。在数学中它表现为典型的抛物型偏微分方程。在概率理论中, 扩散方程通过福克普朗克方程和布朗运动的研究联系起来。事实上, 任何传感器节点都不是同其他传感器节点孤立开来的。所有节点的信息总是会相互影响, 简言之, 任何一个节点的信息都会影响邻近节点的信息; 同样地, 它会受到临近节点信息的影响。其实, 在这种情况下, 信息可以被看作类似墨水一样的物质。在这个场景下, 它可被看作信息的扩散过程, 称之为信息传播。

本文的贡献在于通过使用扩散方程, 使得信息分布将在无线传感器网中变得逐渐平稳。对于使用梯度下降技术的导航系统, 使用信息势场可以做到方便适用、确保信息查询畅通。大部分这些以梯度为依据的计算方法, 应用了物理现象中自然梯度的

方法, 由于大多数物理量的空间分布。例如, 用于测量物体发热程度的单位: 温度数值, 遵循自然扩散定律, 不同于文献[4]中的方法, 本文的方法不要求每个节点上电势场数值的精确性。在导航程序初期阶段, 只需要任意一个局部的信息量不变, 通过扩散方程建立起来的平滑电势场可以更有效地引导客户达到一个信息位势水平高的区域。本文提出的相关优化问题是为了使电势场变得更平滑, 采用变分方法来解决这一问题。在最后阶段, 建造一个更加平滑的位势场, 来指引客户达到空车位置从而满足需求。正如文献[2~12]所述, 如果位势场被假定为一个调和函数, 在某些情况下强制性的约束可能会导致不合理的方案(它提供了不恰当的导航信息)。因此本文的解决方法中引入了泊松问题并且降低了约束条件。只要周围相关的环境中信息变化比建立或维护临近信息源的时间慢, 传感器设备便能够通过梯度算法更加有效地、便捷地引导客户到达他们所希望的目的地。

## 2 具有局部特征的信息电势场

在物理世界中, 扩散方程起着非常重要的作用, 许多物理现象显示, 在宇宙中一切事物都与其他事物有关。它们可以相互影响, 同样信息也如此。考虑到停车场传感器信息的分布由停车场的使用状态(占用中或者处于空的状态)决定, 这是确保每个节点的信息是固定的, 没有这些信息的物理交换。不过首先得考虑信息本身之间的互动性, 因为它们之间的潜在联系和人类习性。例如, 当某人走进餐馆时, 位置和其他的因素共同影响用户的决定(最终目的地)。确切地讲, 从普适意义上来讲, 一般用户都会试图前往朝着良好的视野和舒适的空间(更低密度)区域。然后, 确定具体的位置。这就意味着客户端通常首先去一个有着较高信息势水平的区域。因此, 为了达到这一目标, 需要几个具有局部特征的流畅信息电势场。

信息扩散和偏微分方程。考虑二维平面情况:

$$u_0(x, y) \quad (1)$$

式(1)表示最初的信息分布和它在每个节点的准确值。但是它并不能告诉局部地区信息化水平, 也不能直接用于指导客户到达信息化水平较高的区域。客户端必须找到一个为  $u(x, y)$  能反映局部区

域信息势场水平的区域。

对于某些局部区域的信息分布：

$$U(p, \delta) = \{(x, y) | \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2} \leq \delta\} \quad (2)$$

其中， $p(x_0, y_0)$  是中心点位置； $\delta$  是一个不确定的很小值，是可以调整的局部参数。

在网络中，信息水平取决于不同程度上内部节点的信息。因此在一定程度上，整个网络中应该考虑信息的可散播性。每个节点作为信息源都应该扩大自己的固有有效信息。随后，引入如下扩散方程（即热扩散方程，本质是一类偏微分方程）<sup>[12]</sup>。

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t}(t, x, y) = c \cdot \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\ u(0, x, y) = u_0(x, y) \end{cases} \quad (3)$$

其中， $c$  为正常数，表示扩散速度。

在式(3)中，将此方程应用于信息扩散过程，假定信息传播过程由式(3)决定，随着时间的变化，信息势场将逐渐成为一个常数位势场。对于用来引导客户到达高度信息化水平的区域来说，它的作用不大。

为了使得在时间足够大的时候，原始信息势场能够演化成一个既能从一定程度上反映局部区域信息水平，又能较好逼近原始信息势场的平滑信息位势场，需要对扩散速度进行控制。考虑如下扩散方程（热方程）问题。

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t}(t, x, y) = F[u(t, x, y)] \cdot \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\ u(0, x, y) = u_0(x, y) \end{cases} \quad (4)$$

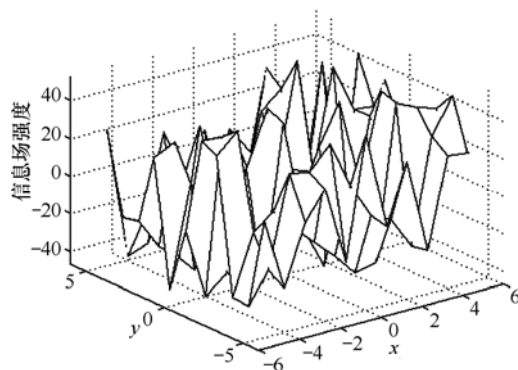
其中， $F[u(t, x, y)] = \left| u(t, x, y) - \frac{1}{|D_\delta(x, y)|} \iint_{D_\delta(x, y)} u_0(x, y) dx dy \right|$ ，

表示每个节点处的扩散速度，其中， $D_\delta(x, y)$  表示点  $(x, y)$  的  $\delta$  邻域。

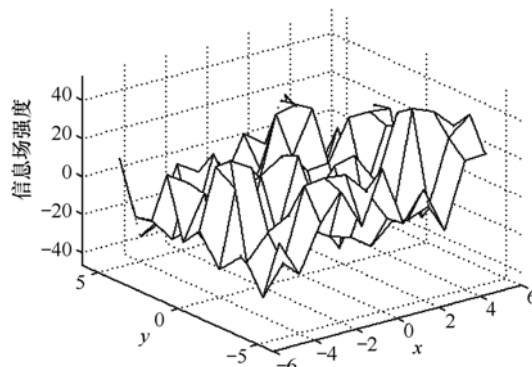
可以证明，该方程的解是唯一存在的。取  $\delta = 2$ ，利用 PDE 数值方法对该方程迭代 2 257 次可以计算得到反应局部区域信息水平的平滑信息位势场（如图 1 所示），并趋于稳定，相对变化不超过 0.01%。

### 3 基于变分模型拟合大尺度位势场

为了得到流畅的信息势场，通过使用梯度下降方法来引导到达目标节点，这需要划分更精确的网格，往每个网格层面填入恰当的信息。实验证明，



(a) 初始态信息场构造



(b) 最终态信息场构造

图 1 信息势场在变系数扩散方程控制下的演化过程

经过调整改善的网格性能良好。通过线性插值方法，针对每个网格 4 个顶点都有具体值，然后可以决定一个四边形的空间。基于内定义三角形的位置，信息梯度中基于三角形坐标可以计算新加入的顶点。

要得到当前误差定义下最优曲面  $v^*(x, y)$ （足够平滑且与  $u(x, y)$  误差足够小），建立如下最优化问题寻找  $v^*$  满足  $E(v^*) = \min \{E(v) | v \in H_0^1(\Omega)\}$ ，其中， $H_0^1(\Omega)$  是  $\Omega$  上的 Soblev 空间。

计算能量泛函的 Euler 方程，引入人工项  $\frac{\partial v}{\partial t}$ ，得到控制演化方程：

$$\begin{cases} \frac{\partial v}{\partial t} = -2\alpha(v-u) + \beta \operatorname{div} \left( \frac{\nabla v}{|\nabla v|} \right) + 2\gamma \Delta v \\ v|_{t=0} = u \end{cases} \quad (5)$$

取  $\alpha = 1, \beta = 1, \gamma = 5, \tau = 0.01$ ，相对误差限  $\varepsilon = 0.0001$ ，采用中心差分格式迭代 149 次可以计算得到大尺度平滑信息位势场  $v^* \approx \lim_{t \rightarrow \infty} v$ （如图 2 所示），并趋于稳定，相对变化不超过 0.009 85%。而误差

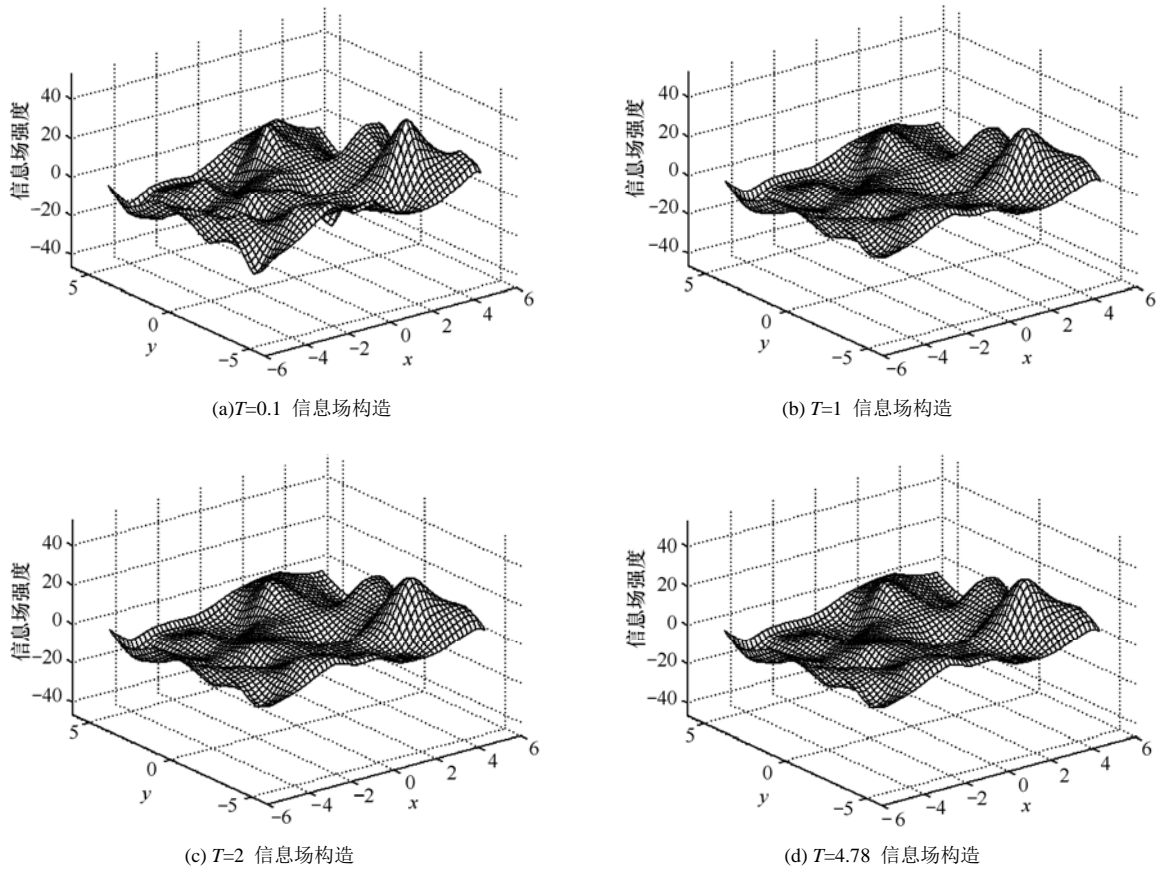


图 2 PDE 变分方法确定的大尺度信息位势场

函数  $E(v)$  值则从  $9.2287 \times 10^4$  降到了  $6.7118 \times 10^4$ 。

#### 4 小尺度局部位势场构造

通过大尺度信息位势场中的不精确配置导航到达原始信息位势场中局部信息水平较高的区域之后，还需要进行小尺度（局部）信息位势场中的精确配置导航，才能到达某一满足信息水平要求的节点处。为此，建立一个在局部各节点处足够精确的平滑信息位势场是有益的。考虑如下拉普拉斯方程边值问题。

$$\begin{cases} \Delta u(x, y) = 0, & (x, y) \in \Omega \\ u(x, y) = u_0, & (x, y) \in \partial\Omega \end{cases} \quad (6)$$

众所周知，给定位势函数在某一区域边界上的值，则区域内部任意一点处的值都可以唯一确定。并且由极值原理进一步可知，极值点一定在边界上。若需要进行精确配置导航的局部区域为  $\Omega$ （多连通区域），则可以由边界节点数据通过多项式插值得到该区域的部分边界条件，再利用内部节点得到该区域的剩余部分边界条件，从而唯一确定整个

$\Omega$  区域上的位势函数值，建立局部的平滑信息位势场。可对当前节点所在局部区域建立类似的 Laplace 问题，求解得到几乎处处平滑的小尺度信息位势场  $v$ （在各局部节点处精确，但不平滑），进行精确配置导航之后到达目标节点，完成需求。

该区域的所有节点被切割为类似拉普拉斯问题的求解区域。这样就可以比较方便独立地计算拉普拉斯函数和获取必须的小尺度信息势场，结果便可用于本地准确配置导航。如图 3 所示。

通过理论分析和仿真验证，发现在几个客户趋于移向一个节点等情况下，该方法能有效降低竞争力度，本文所提出的方案能有效降低竞争力度。从数学理论的角度来看，原工作<sup>[2]</sup>不仅要求二阶导数必须存在，还要求满足拉普拉斯方程。本文的方案仅仅要求所建立的势场能符合如式（5）所示的一阶连续可微方程。构建势场约束条件明显下降了。采用泊松方程计算的约束条件比拉普拉斯方程约束条件低。如图 4 所示，基于先前使用的这个方案可以明确地验证客户移向信息化程度低的区域。当信息量相对于用户需求的数量不足时，它可能导致

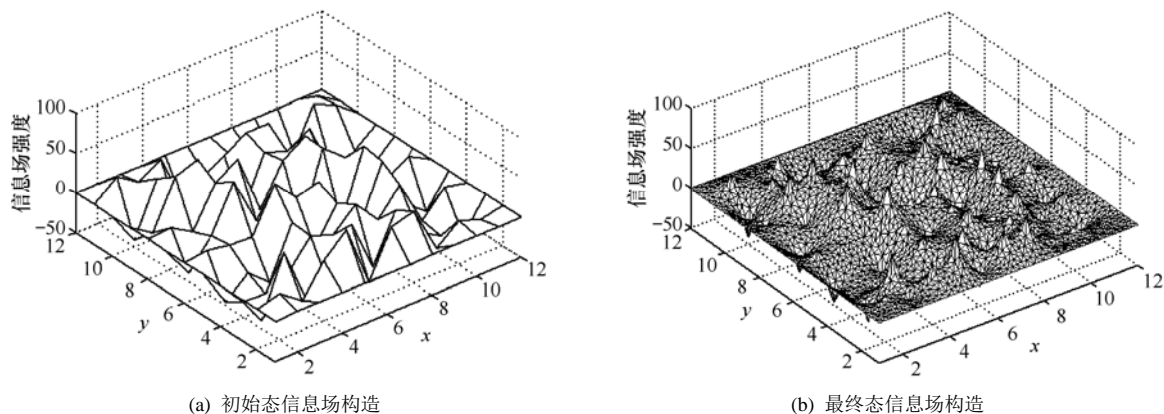


图 3 拉普拉斯方程方法构造的小尺度信息势场

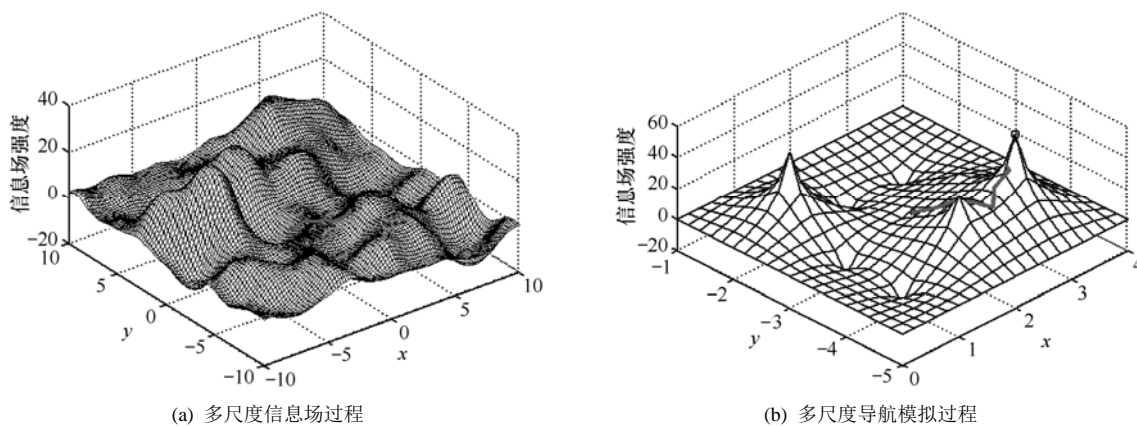


图 4 单用户模式下多尺度梯度下降过程

激烈的竞争。本文的方法可以最大程度地消除竞争并且能便捷地完成导航任务。该方法最大的优势在于能够协调用户的需求关系并减少总的冲突次数。

### 5 仿真实验与性能评价

从以下几个方面评估模拟实验的信息电势场：信息电势场的建设和维护的成本，网络的不稳定性，质量查询与梯度精度成本的平衡性。

#### 5.1 模拟实验搭建

模拟实验使用无线传输工具与 TOSSIM<sup>[6]</sup>的无线电模型中使用的模式是相同的（普通模式）。在普通模式下，理想条件传输范围内的所有节点都可以进行顺利地沟通。在 TOSSIM 无线电模型的节点位置安装了节点，并能使每对节点能相互连通且链路质量得以保证。在所有实验中，在任何一个时段，可以随机设定百分比而没有连接的限制。可以按照需要的方式来维护信息场的运转。

基于临近发现协议建立了一个梯度。梯度维护和路由都在网络层，可采用现有的协议来维持每个节点的相邻列表<sup>[18-25]</sup>。

#### 5.2 避免竞争

本方法可以协调不同的客户之间的需求和减少甚至消除由竞争产生的冲突。如图 5 所示。在现实情况下，当竞争冲突发生时，用户需要重新开始导航，朝着右上角的方向前进，但这样会造成更大的代价浪费。寻找移动的可能性会受平级之间竞争和信息之间紧密沟通程度的影响。一般来说，移动方向与信息量成反比而与竞争激烈程度成正比。之前的研究工作<sup>[2]</sup>只得到图 5(a)的结果，不能避免竞争的冲突。最主要的原因是早期比较孤立地认为不同方向的信息有着紧密的联系和区别。然而，本文的研究工作更细致地思考了上面提到的内在联系和分歧，因此获得了更好的实验结果，如图 5(b)所示。

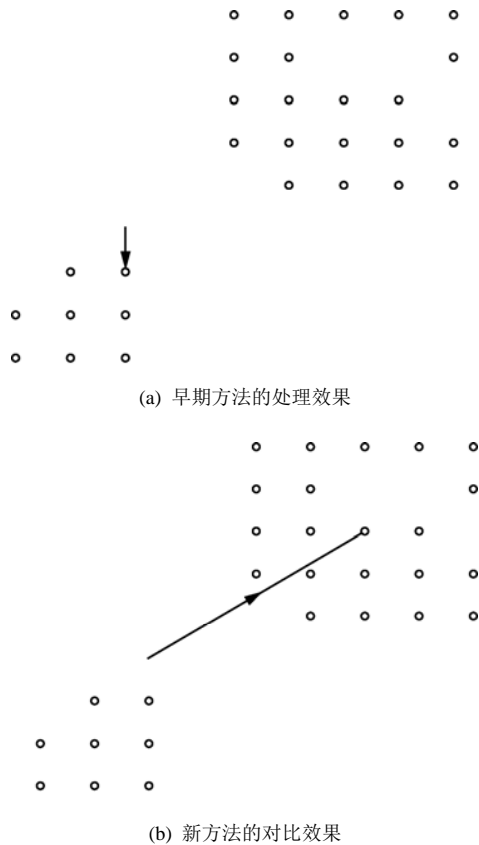


图 5 新旧导航方法的对比

## 6 结束语

本文把信息传播过程考虑到了导航系统的问题中。把扩散方程、变分法、泊松方程引入导航过程中,使其操更便捷和容易。拥有 2 个平滑信息梯度场的传感器网络,更有利于满足客户的需求。其一,通过使用扩散方程,在整个区域上建立信息势场。它较好地描述了局部的信息水平。变分公式适用于平稳/平滑的信息势场。另一个信息势场是通过泊松方程来局部地确定,因为每个节点都有精确的值。梯度下降法可用于导引客户到达它们的目标。在常见应用中,PDE 结构具有更多的灵活性和适用性。本文的方案达到了预期的使导航系统高效和便捷的目的。以往方法<sup>[2]</sup>产生的不合适的信息势场可以通过本文的方法来纠正。侧重于局部区域的考虑,综合考虑了负载均衡和局部竞争。当数据源动态变化的时候,每个节点的信息水平可被及时更新。通过扩展的扩散方程,不同的势场可以被整合到一起。TOSSIM 仿真实验验证了该方法的有效性和易用性。在后续的研究中,会进一步地考虑其他相关问题。

## 参考文献:

- [1] LI M, WANG J, YANG Z, *et al.* Demo abstract: sensor network navigation without locations[A]. Proceedings of ACM SenSys[C]. New York, USA, 2008.
- [2] LIN H J, LU M H, MILOSAVLJEVI N, *et al.* Composable information gradients in wireless sensor networks[A]. Proc of the International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'08)[C]. Washington, DC, USA, 2008. 450-459.
- [3] DIBENDETTO E, Degenerate parabolic equations[A]. Springer Verlag[C]. Berlin, Germany, 1993. 131-165.
- [4] LIU J, ZHAO F, PETROVIC D. Information-directed routing in ad hoc sensor networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(4):851-861.
- [5] GAO J, GUIBAS L J, HERSHBERGER J, *et al.* Sparse data aggregation in sensor networks[A]. Proc of the International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'07)[C]. Cambridge, England, 2007. 430-439.
- [6] TOSSIM: A simulator for TinyOS networks. User's manual in TinyOS documentation[EB/OL]. <http://www.cs.berkeley.edu/~pal/research/tossim.html>, 2003.
- [7] GAO J, GUIBAS L, HERSHBERGER J, *et al.* Fractionally cascaded information in a sensor network[A]. Proc of the 3rd International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'04)[C]. New York, USA, 2004. 311-319.
- [8] INTANAGONWIWAT C, GOVINDAN R, ESTRIN D. Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks[A]. Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking[C]. New York, USA, 2000. 56-57.
- [9] KALANTARI M, SHAYMAN M. Design optimization of multi-sink sensor networks by analogy to electrostatic theory[A]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference[C]. Las Vegas, Nevada, USA, 2006.
- [10] LI M, WANG J, YANG Z, *et al.* Demo abstract: sensor network navigation without locations[A]. Proceedings of ACM SenSys[C]. New York, USA, 2008. 391-392.
- [11] MADDEN S, FRANKLIN M J, HELLERSTEIN J M, *et al.* TAG: a tiny aggregation service for ad-hoc sensor networks[J]. SIGOPS Oper Syst Rev, 2002, 36(SI):131-146.
- [12] MCOWEN R C, Partial Differential Equation: Methods and Applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [13] NI S Y, TSENG Y C, CHEN Y S, *et al.* The broadcast storm problem in a mobile ad hoc network[A]. Int Conf on Mobile Computing and Networking (MobiCom'99)[C]. New York, USA, 1999. 151-162.
- [14] POLASTRE J, HUI J, LEVIS P, *et al.* A unifying link abstraction for wireless sensor networks[A]. In SenSys '05: Proc of the 3rd ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems[C]. New York, USA, 2005. 420-429.

- [15] SARKAR R, ZHU X, GAO J. Hierarchical spatial gossip fomulti-resolution representations in sensor networks[A]. Proc of the International Conference on Information Processing iSensor Networks (IPSN'07)[C]. New York, USA, 2007.420-429.
- [16] SKRABA P, FANG Q, NGUYEN A, *et al.* Sweeps oewireless sensor networks[A]. IPSN '06: Proceedings of the Fifth International Conference on Information Processing Sensor Networks[C]. New York, NY, USA, 2006.143-151.
- [17] THULASIRAMAN P, RAMASUBRAMANIAN S, KRUNZ M. Disjoint multipath routing to two distinct drains in a multi-drain sensor network[A]. Proceedings of IEEE INFOCOM[C]. New York, USA, 2007. 56-67.
- [18] BORENSTEIN J, EVERETT H R. Navigating mobile robots:sensors and techniques[M]. Wellesley, 1992.
- [19] WANG G, CAO G, LAPORTA T. A bidding protocol for deploying mobile sensors[A]. Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Network Protocols[C]. Washington, DC, USA, 2003. 315-324.
- [20] INTANAGONWIWAT C, GOVINDAN R, ESTRIN D. Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks[A]. Proceedings of the Sixth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking[C]. New York, USA, 2000. 56-57.
- [21] HEINZELMAN W R, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks[A]. Proceedings of the 33rd International Conference on System Sciences[C]. Washington, DC, USA, 2000.
- [22] YE F, ZHONG G, LU S, *et al.* Gradient broadcast: a robust data delivery protocol for large scale sensor networks[J]. ACM Wireless Networks (WINET), 2005, 11(2):285-298.
- [23] YU Y, GOVINDAN R, ESTRIN D. Geographical and energy aware routing: a recursive data dissemination protocol for wireless sensor networks[A]. UCLA Computer Science Department Technical Report UCLA/CSD-TR-01-0023[C]. The Netherlands, 2001. 215-219.
- [24] KHATIB O. Real-time Obstacle avoidance for manipulators and mobile robots[A]. IEEE Int Conf on Robotics and Automation[C]. St. Loius, Missouri, 1985. 500-505.
- [25] PATHAK K, AGRAWAL S K. An integrated path planning and control approach for nonholonomic unicycles using switched local potentials[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2005, 21(6):1201-1208.

#### 作者简介:



**魏崑** (1975-), 男, 陕西西安人, 博士, 西安理工大学讲师, 主要研究方向为物联网、无线传感器网络等。



**张亮** (1981-), 男, 陕西眉县人, 博士, 西安电子科技大学副教授, 主要研究方向为嵌入式多核众核系统、移动机器人技术。



**郭得科** (1980-), 男, 甘肃景泰人, 博士, 国防科学技术大学副研究员, 主要研究方向为并行分布式计算、无线网络、移动计算、对等计算、数据中心。



**沈沛意** (1969-), 男, 浙江绍兴人, 西安电子科技大学教授, 主要研究方向为计算机视觉、DSP/FPGA 理论及应用、数字图像处理、计算机网络等。