

普适计算中的定位误差分析

周 艳^{1,2}, 赵 海¹, 张 君¹, 李海成²

(1. 东北大学信息科学与工程学院, 辽宁沈阳 110004; 2. 辽东学院信息技术分院, 辽宁丹东 118003)

摘 要: 在二维空间定位服务中, 通过对定位过程中产生的误差区域进行分析, 提出了参考点优化选择定理, 参考点优化选择定理表明在室内定位过程中有针对性选择参考点能使定位误差最小, 为室内环境中布置和选择定位参考点提供了相应的理论基础. 在此基础上, 对传统定位算法进行了改进, 提出了定位参考点优化选择算法(RNOS). RNOS 算法以参考点与未知节点之间位置关系为基础, 通过选择出合适的参考点来计算未知节点的位置, 可以提供更准确的定位信息. 仿真实验表明本文所提出的参考点优化选择算法能更好地满足对普适终端实时定位的需求, 且具有较高的定位精度.

关键词: 普适计算; 定位误差; 定位参考点; 优化选择; 参考点优化选择算法

中图分类号: TP316 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 02-0382-05

Location Error Analysis of Pervasive Computing

ZHOU Yan^{1,2}, ZHAO Hai¹, Zhang Jun¹, LI Hai cheng²

(1. School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110004, China;

2. Information Technology College, Liaodong University, Dandong, Liaoning 118003, China)

Abstract: In the localization service of two dimensional space, reference nodes optimizing selection theorem in two dimensional space is proposed on the basis of analyzing the location error areas. The theorem of reference nodes optimizing selection indicates that purposive selection of reference nodes will minimize the location error in the process of indoor localization. Meanwhile this theorem builds up theoretical foundation for the layout and selection of reference nodes in indoor environment. Based on this, reference nodes optimization selection algorithm(RNOS Algorithm) is proposed by improving the traditional polygon positioning algorithm. This algorithm is based on the relationship between the position of reference nodes and the position of unknown node. By selecting optimum reference nodes in the process of calculating the unknown nodes' position, the more accurate location information can be obtained. The simulation results indicate that the location reference node optimization selection(RNOS) algorithm can meet the requirement of pervasive terminal's real time localization and possesses the preferable localization precision.

Key words: pervasive computing; location error; location reference node; optimizing selection; reference node optimization selection algorithm

1 引言

在普适计算在室内定位过程中, 定位误差主要来源于多径传播问题、NLOS 传播问题和参考点间相对位置. 对于多径传播问题目前已提出一些抗多径传播的有效方法, 如高阶谱估计^[1]、最小均方估计^[2]及扩展的卡尔曼滤波(EKF)^[3]等. 降低 NLOS 传播的影响通常有利用测距误差统计的先验信息将一段时间内的 NLOS 测量值调节到接近 LOS 的测量值; 降低非线性最小二乘法中 NLOS 测量值的权重; 在算法中对于在非非线性最小二乘法中增加一约束项^[4-6], 从而提高定位精度.

在由大量设备组成的普适计算环境中, 当移动对象要确定自己的位置时, 需要由相应的定位参考点为其提

供定位服务. 在普适计算的多边定位法中, 未知节点的定位误差与参考点之间的相对位置有直接的关系, 并且会直接影响到未知节点的定位误差. 对于同一个定位目标而言, 与参考点之间的位置形式的不同会导致未知节点的定位误差大小不同. 未知节点在定位过程中有针对性选择参考点进行定位就能够有效的减小定位误差, 提高定位精度, 因此研究定位误差与参考点的位置是定位过程中的一个关键因素.

2 参考点优化选择定理

二维空间中的节点定位过程中, 当不存在误差时, 三个定位参考点即一个定位单元能唯一相交于一点, 从而确定未知节点的位置^[7-9]. 而当存在误差时, 三个参

考点相交成一个小区域,如图 1 所示. 以下假定这个误差的范围在 $(0 \pm \varepsilon, \varepsilon > 0)$. 即当两个节点之间的真实距离为 r 时, 那么定位距离的测量值就在 $(r, r \pm \varepsilon)$ 之间. 图中三圆相交围成的小区域, 记为 C_p , 该区域的面积则表示定位误差的大小.

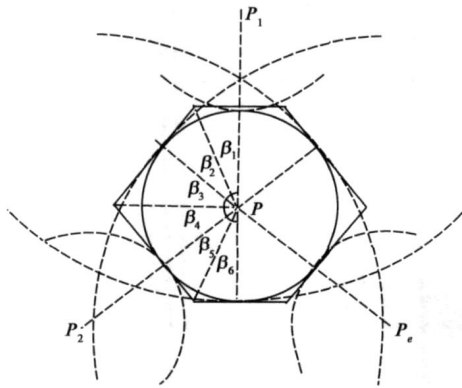


图1 定位误差的分析

设未知节点 P 的坐标为 (x, y) , 定位单元的三个参考点 P_i 的坐标分别为 $(x_i, y_i), (i = 1, 2, 3)$, 与未知节点 P 的距离为 r_i, ε 为距离测量误差, 可以得到如下表达式:

$$C_p = \left\{ (x, y) \mid \begin{aligned} &(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 \leq (r_i + \varepsilon)^2, \\ &(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 \geq (r_i - \varepsilon)^2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$C_p = \left\{ (x, y) \mid x \in \bigcap_{i=1}^3 C_{p_i}, y \in \bigcap_{i=1}^3 C_{p_i} \right\} \quad (2)$$

$$S_p = \left\{ (x, y) \mid x^2 + y^2 = \varepsilon^2, \varepsilon > 0 \right\} \quad (3)$$

当式(2)中的 $\varepsilon = 0$ 时, $\bigcap_{i=1}^3 C_{p_i}$ 将汇聚一点; 当 $\varepsilon > 0$ 时, $\bigcap_{i=1}^3 C_{p_i}$ 将是一个正的小区域 C_p , 这个小区域也代表了定位误差的大小, S_p 是 C_p 内半径为 ε 的圆.

在室内定位过程中, 为了保证较高的定位精度, 一般使用超声波等高精度定位技术, 定位误差一般 5~10cm, 那么定位误差区域就会相对较小, 同时室内环境在各个方向上信号传播引起的误差差别不大, 为了简化分析, 这里假定距离测量误差的大小是相等的, 即 $\varepsilon_i = \varepsilon, i = 1, 2, 3$.

设过点 P 和 P_i 的直线交式(3)中的圆 S_p 于两点. 过这两点分别作 S_p 的切线, 切线间相交成六边形, 如图 1 所示. 当测量误差 ε 较小时, 边缘的区域可以被线性化, 并且被估计为 \tilde{C}_p . 这样, 下面的问题就转变为探讨在何种情况下定位误差 \tilde{C}_p 最小.

定义 1 一个子集 $S \in R^n$, 如果对于任意两个不同点 $x_1 \in S$ 和 $x_2 \in S$, 并且对于任意实数 λ 具有满足取值在 $[0, 1]$ 之间, 有 $\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2 \in S$ 成立, 则 S 是凸集.

定义 2 任意两个不同点 $x_1 \in S, x_2 \in S$, 且对于任意实数 λ 使取值在 $[0, 1]$ 之间, 有 $f(\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2) \leq$

$f(x_1) + (1 - \lambda)f(x_2)$ 成立, 则 $f(x)$ 是定义在凸集 S 上的凸函数.

引理 1 对于定义在凸集 $S \in R^n$ 上的一个光滑函数 $f(x)$, 对于在 S 上的 x 当且仅当 $f''(x) \geq 0$, 则 $f(x)$ 是凸函数, 当且仅当 $f''(x) > 0$ 的时候, $f(x)$ 是严格凸函数^[10].

引理 2 对于一个定义在子集 S 上的凸函数 $f(x)$, 如果有 m 个点 x_1, x_2, \dots, x_m , 则有 $f(\frac{1}{m}(x_1, x_2, \dots, x_m)) \leq \frac{1}{m}(f(x_1) + f(x_2) + \dots + f(x_m))$ 成立, 如果 $f(x)$ 是严格凸函数, 那么只有在 $x_1 = x_2 = \dots = x_m$ 时才成立^[11].

定义 3 设 f 是定义在非空凸集上 $S \in R^n$ 的凸函数, 则形式为

$$\left. \begin{aligned} &\min f(x); \\ &\text{s. t. } x \in C \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

的最优化问题称为凸规划问题.

引理 3 设 x^* 是凸规划(4)的局部极小点. 则当 f 是严格凸函数时, x^* 是式(4)的全局唯一极小点.

定理 1 未知节点 $P(x, y)$ 相对三个定位参考点中的任意两个参考点的夹角(锐角)都同时趋近于 60° 时, 定位误差值越来越小; 未知节点 $P(x, y)$ 相对三个定位参考点中的任意两参考点的夹角同时等于 60° 时, 定位误差值最小.

证明 (1)不失一般性, 因为 \tilde{C}_p 构成的区域为圆的外切六边形, $S(\tilde{C}_p)$ 的面积由 12 个直角三角形组成, 如图 1 所示. 设每个直角三角形内角依次为 $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6$, 可知 $\beta_1 = \beta_2, \beta_3 = \beta_4, \beta_5 = \beta_6$, 并且都为锐角, 那么存在以下表达式:

$$S(\tilde{C}_p) = 2\varepsilon^2(\tan\beta_1 + \tan\beta_3 + \tan\beta_5) \quad (5)$$

已知 $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6$ 为锐角, 并且 $\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4 + \beta_5 + \beta_6 = \pi$, 则 $\beta_1 + \beta_3 + \beta_5 = \frac{\pi}{2}$.

因为, $(\tan x)^n = 2\tan x(1 + \tan x) \geq 0$, 所以当 $0 \leq x \leq \frac{\pi}{2}$ 时, 应用引理 1 和引理 2 可以导出如下表达式:

$$\begin{aligned} S(\tilde{C}_p) &= 6\varepsilon^2 \frac{1}{3}(\tan\beta_1 + \tan\beta_3 + \tan\beta_5) \\ &\geq 6\varepsilon^2 \tan \frac{\beta_1 + \beta_3 + \beta_5}{3} \end{aligned} \quad (6)$$

当 $\beta_1 + \beta_3 + \beta_5 = 30^\circ$ 时等式(6)成立, 所以当未知节点 $P(x, y)$ 相对三个定位参考点中的任意两参考点的夹角同时等于 60° 时, 未知节点的定位误差 $S(\tilde{C}_p)$ 最小, 最小值如下式:

$$S(\tilde{C}_p) = 2\sqrt{3}\varepsilon^2 \quad (7)$$

(2) 因为 $S(\tilde{C}_p)$ 是严格凸函数, 应用定义 3 和引理 3 可知, 当 $\beta_1 + \beta_3 + \beta_5 = 30^\circ$ 时, $S(\tilde{C}_p)$ 是全局唯一极小值, 即当未知节点 $P(x, y)$ 相对三个定位参考点中的任意两参考点的夹角同时趋近于 60° 时, $S(\tilde{C}_p)$ 的值越来越小. 在实际室内定位过程中, 可以设定一个阈值 λ 选取三个夹角同时位于区间 $[60^\circ - \lambda, 60^\circ + \lambda]$ 的定位参考点实现对未知节点定位, 同时定理 1 也称为参考点优化选择定理.

3 定位算法改进

传统的多边形定位算法在资源受限环境下, 定位过程中计算能力, 要求的时、空开销都较大^[12, 13], 因而很难在资源受限的普适终端上实现. 本文针对传统多边形定位算法的不足, 基于参考点优化选择定理, 提出了定位参考点优化选择算法.

3.1 传统的多边形定位算法(TPP)

为了与本文提出的定位误差最小选择算法进行对比, 现将传统的多边形定位算法的定位过程描述如下:

(1) 每个移动节点周期发送广播包, 广播包包含如下定位信息 $\{ID, T_{send}, (a, b)\}$. 其中, ID 是移动节点的标识, T_{send} 是发送消息的时间, (a, b) 是移动节点坐标.

(2) 定位参考点接收到多个广播包后, 就可利用发送节点的发送时间 T_{send} 与接收节点的接收时间 T_{recv} 之间的时间差 T_{diff} 来计算节点之间的距离. 让后将相关数据传送到计算中心.

(3) 计算中心对于所有接收到的 N 个消息, 按照 C_N^3 组合, 判断它们是否在一条直线上.

(4) 对每一组不在一条直线上的点, 分别计算未知节点的位置 $\{L_1, L_2, \dots\}$.

(5) 最后, 对集合中所有计算的位置取平均值 L_{avg} , L_{avg} 就是未知节点的位置估计.

可以看出, 传统的多边形定位算法首先粗略计算未知节点的位置, 然后通过多个类似的过程来逐步提高未知节点的定位精度. 随着节点数量的增加, 算法的计算量将以几何级数增长, 无法满足定位实时性要求.

3.2 定位参考点优化选择算法(RNOS)

依据本文提出的定位误差最小定理, 有针对性地选择定位单元可以减小定位误差. 算法的定位过程如下:

(1) 首先, 二维空间中任意两个参考点的之间距离 $S_{ij} (i \neq j)$ 计算并永久存储于计算中心数据库中.

(2) 移动节点周期发送广播包, 广播包包含如下定位信息 $\{ID, T_{send}, (a, b)\}$. 其中, ID 是移动节点的标识, T_{send} 是发送时间, (a, b) 是移动节点坐标.

(3) 收到广播包第 i 个参考点利用得到未知节点的

发送时间 T_{send} 与接收时间 T_{recv} 的差 T_{diff} 来计算节点之间的距离 L_i . 让后将相关数据传送到计算中心.

(4) 计算中心对于所有接收到的 N 个消息, 按照 C_N^3 的组合, 利用公式 $\cos a_{i,j} = \frac{L_i^2 + L_j^2 - S_{ij}^2}{2L_i L_j}$ 计算未知节点与每两个参考点的夹角.

(5) 利用三个夹角都位于 $[60^\circ - \lambda, 60^\circ + \lambda]$ 之间的三个参考点计算未知节点的位置. 对每一组符合条件的锚节点, 分别计算未知节点的位置 $\{H_1, H_2, \dots\}$.

(6) 最后, 对集合中所有计算的位置取平均值 H_{avg} , 这时计算结束.

该算法在确保定位误差较小的同时, 减少了计算量, 保证了定位计算的实时性, 能够对移动用户进行实时位置跟踪, 从而更好地满足普适计算环境下的定位需求.

4 定位误差分析

一般地, 影响定位误差的可能因素主要有: (1) 节点间距离测量误差; (2) 参与定位的参考点数量; (3) 参考点间的相对几何位置. 本节主要对参考点间的相对几何位置引入的误差和随机选取定位参考点引入的定位误差进行定量分析, 来分析两种算法的性能.

首先, 求解参考点优化选择定理引入的定位误差. 由定理 1 知, 当未知节点与定位单元三个顶点的角度为 $\frac{2\pi}{3}$ 时, 定位误差最小. 由式(7)可知定位误差的最小值为:

$$S(\tilde{C}_{p_0}) = 2\sqrt{3}\varepsilon^2$$

其次, 求解随机选取参考点所引入的定位误差. 这里采用求误差的数学期望值 $E[S(\tilde{C}_{p_0})]$, 即平均的误差区域, 代入式(7)得:

$$E[S(\tilde{C}_{p_0})] = 2\varepsilon^2 E[\tan\beta_1 + \tan\beta_2 + \tan\beta_3]$$

为了便于计算和推导, 将上式中的 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 分别替换为 x, y, z , 则 x, y, z 满足 $x + y + z = \frac{\pi}{2}$, 消去未知变元, 则有:

$$E[S(\tilde{C}_{p_0})] = 2\varepsilon^2 E[\tan x + \tan y + \cot(x + y)] \quad (8)$$

由于变元 x, y 在区域 D 上服从均匀分布, $D = \{(x, y) | x > 0, y > 0, x + y < \frac{\pi}{2}\}$, 所以 x, y 的联合概率密度函数是: $f(x, y) = \frac{8}{\pi^2}$, 代入式(9)中, 得:

$$E[S(\tilde{C}_{p_0})] = 2\varepsilon^2 E[\tan x + \tan y + \cot(x + y)] \\ = \left[\frac{24}{\pi} \ln 2 \right] \varepsilon^2 \quad (9)$$

比较式(7)与式(9)的结果, 当未知节点与定位单元

中的任意两个参考点的夹角为 $\frac{2\pi}{3}$, 可以有效缩小定位误差, 提高定位精度, 以参数 β 表示提高定位精度的百分比, 则 β 值为:

$$\beta = \frac{\left[\frac{24}{\pi} \ln 2 \right] \varepsilon^2 - 2\sqrt{3} \varepsilon^2}{\left[\frac{24}{\pi} \ln 2 \right] \varepsilon^2} = 34.9\%$$

通过对定位误差的定量计算, 可知当依据定理 1 计算未知节点时, 可使定位精度平均提高约 34.9% 左右, 通过多个定位单元可以进一步减小误差。

5 仿真实验及算法评价

对于本文提出的参考点优化选择定理及定位参考点误差进行测试, 采用了以下二种方法: (1) 利用 MATLAB7.0 计算定位误差, 通过加入距离测量误差等噪声或干扰因素以验证本文提出的参考点优化选择算法的性; (2) 以 Webit5.0 为实验平台, 对算法的实时性进行测试; Webit5.0 是由辽宁省嵌入式技术重点实验室自主开发的普适终端设备, 主控芯片采用了 8 位微控制器 AVR Atmega128 进行设计, 运行了基于优先级抢占式的嵌入式实时操作系统 WebitOS.0, 内嵌了轻型 TCP/IP 协议栈, 支持硬实时应用和设备间通信。

5.1 误差分析

利用 Matlab 对参考点优化选择(RNOS)算法和二阶段定位(TPP)算法进行相应的测试, 两种定位算法的定位误差相比较, 见图 2 所示。

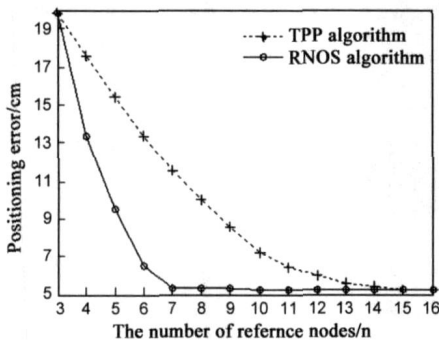


图2 不同参考点数目下两种算法的定位误差比较

从图 2 可以看出, 随着参考点数目增多, 未知节点的定位误差将逐渐减小, 开始时定位误差下降的速度较快, 后来下降的速度趋缓。当参考点数目大于 7 的时候, RNOS 算法定位误差下降速度较慢, 其原因可能是由于新增加的参与定位的参考点对定位误差的结果影响不大, 在实际定位过程, 可以只选取满足定理 1 的部分定位单元参与定位, 在满足定位精度前提下可以缩短定位时间。

TPP 算法随着参考点数目增加, 定位误差逐渐减小, 但是计算量将呈指数倍增加, 它是通过加大计算量

来换取定位精度。同时, 在参考点布局的情况相同这个条件下, 通过对两种定位算法的比较, 验证了 RNOS 算法比 TPP 算法在一定范围内可以较大幅度的提高定位精度, 减小定位误差。

5.2 实时性比较

针对定位算法的定位实时性测试, 这里在 Webit5.0 的试验平台上对本文所提出的 RNOS 算法和传统的 TPP 算法分别进行了实现, 同时测试了随着参与定位计算的参考点数目变化时, 每种定位算法的定位实时性的变化趋势, 实验数据的变化趋势如图 3 所示。

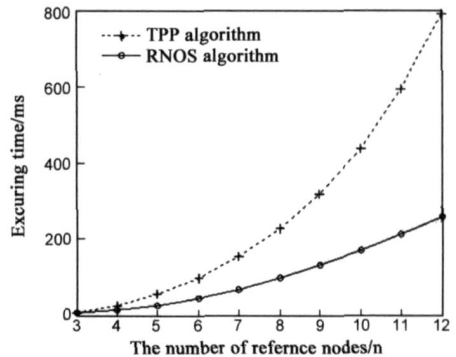


图3 参考点数目不同时的定位时间

从图 3 中可以看出, 当随着参考点数目的增加, 传统算法的时间开销是呈指数性增加的, 而 RNOS 算法的时间开销从曲线的增加比例来讲是缓慢上升。这个算法的执行时间开销和具体设备的计算能力相关。

5.3 跟踪轨迹比较

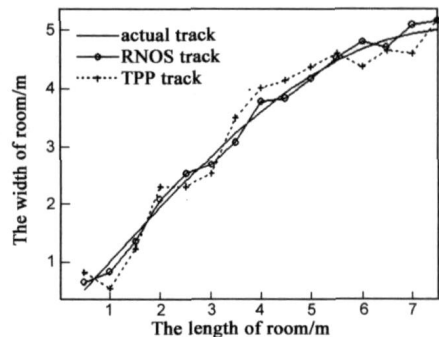


图4 两种算法分别估计移动节点轨迹的比较

为了比较本文提出的参考点优化选择算法和传统的多边形定位算法的性能, 利用 Matlab 建立了一个 15.0m × 15.0m 的仿真环境, 摆放了 21 个参考点和 1 个移动的节点, 移动速度为 4m/s。随着节点的不断移动, 其周围所能通信的参考点的数目是不断变化的, 参与定位的参考点数目也是不同的。因此, 可以对两种定位算法的跟踪轨迹与实际移动轨迹进行比较, 图 4 给出了局部测试结果。显然, 将通过定位计算得出的移动节点跟踪轨迹和实际移动轨迹相比, 定位参考点优化选择(RNOS)算法比传统的多边形定位(TPP)算法更准

确,更加接近于移动节点的实际行走轨迹.

6 结论

位置信息是普适计算中首先要解决的一个关键问题.首先,本文通过对定位过程所产生的误差区域进行分析,提出并证明了关于参考点优化选择定理,为在二维空间中计算未知节点的位置提供了理论依据.其次,对传统的多边形定位算法进行了改进,提出了定位参考点优化选择算法,该算法在降低定位误差的同时,很好地满足了定位的实时性要求.最后,通过仿真实验进行了验证.

参考文献:

- [1] Hickman G, Krolik J. Multipath delay estimation using the magnitude spectrum [A]. 2005 IEEE/SP 13th Workshop on Statistical Signal Processing[C]. Bordeaux, France, 2006. (1): 615- 620.
- [2] Song I, Lee J. Least squares based timing acquisition and tracking for closely spaced multipath in DS-SS CDMA [J]. IEICE Transactions on Communications, 2006, E89-B(3): 959- 962.
- [3] Lakhzouri A, Lohan E S, Hamila R. Solving closely spaced multipaths via extended Kalman filter in WCDMA downlink receivers[A]. 5th European Personal Mobile Communications Conference 2003[C]. Glasgow, U K, 2003. 271- 275.
- [4] Feng K T, Chen C L, Chen C H. GALE: an enhanced geometry assisted location estimation algorithm for NLOS environments[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2008, 7(2): 199- 213.
- [5] Chang R, Lu S W, Zhang J. TOA data process method for improving the position location accuracy in NLOS environment [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(8): 946- 949.
- [6] Wang W, Huang J Y, Wan Q, et al. Location of mobile terminals based on LS-SVM with survey points in NLOS environment [A]. 9th International Conference on Telecommunications, ConTEL 2007[C]. Zagreb, Croatia, 2007. 307- 310.
- [7] Reyero L, Delisle Y. Always best located, a pervasive positioning system [A]. 2007 2nd International Symposium on Wireless Pervasive Computing[C], San Juan, United States, 2007, 572- 576.
- [8] Doherty L. Algorithms for position and data recovery in wireless sensor networks[D]. UC Berkeley, 2000.
- [9] Izquierdo F, Ciurana M, Barcelo F, et al. Performance evaluation of a TOA-based trilateration method to locate terminals in WLAN [A]. International Symposium on Wireless Pervasive Computing 2006[C], Phuket, Thailand, 2006, 2: 1- 6.
- [10] 黄廷祝. 线性代数与空间解析几何[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [11] 吴光磊. 解析几何简明教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [12] Hitt L R, Zhang X M. Dynamics Geometry of Polygons[J]. Elem Math, 2001, 56(1): 21- 37.
- [13] Ulman J, Gerantiotis E. Motion detection using TDOA and FDOA measurement [J]. Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on, 2001, 37(2): 759- 764.

作者简介:



周 艳 女, 1968 年生于辽宁丹东, 东北大学博士研究生, 辽东学院副教授, 主要研究方向为普适计算和传感器网络.

E-mail: zhy03@126.com.



赵 海 男, 1959 生于辽宁沈阳, 东北大学教授、博士生导师, 主要研究方向为普适计算、嵌入式 Internet、传感器网络等.

张 君 女, 1966 年生于辽宁沈阳, 东北大学博士研究生, 东北大学讲师, 主要研究方向为普适计算和复杂网络.

李海成 男, 1966 年生于辽宁葫芦岛, 辽东学院副教授, 主要研究方向为嵌入式 Internet, 自动控制等.