

无线传感器网络中基于虚拟力的分布式节点定位

熊 喆¹ 贾 杰¹ 陈 剑^{1,2}

(东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110819)¹ (东北大学教育部医学影像计算重点实验室 沈阳 110819)²

摘 要 节点定位是无线传感器网络应用中需要解决的一个基本问题。传统算法大都基于集中式方法估计节点位置,从而导致较大开销。因此,结合最小二乘法进行初步估计定位,并在此基础上,给出了基于虚拟力的传感器节点定位模型,提出了基于虚拟力的分布式定位算法,该算法通过邻居节点间信息的分布式交互,能够有效节省定位开销。进一步,在定位过程中引入未知节点升级机制,以提高收敛速度。一系列仿真实验表明,该算法能够通过分布式迭代定位,快速实现全网节点的精确定位。

关键词 无线传感器网络,分布式定位,最小二乘法,虚拟力,升级机制

中图分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.2.025

Distributed Localization Scheme Based on Virtual Force in Wireless Sensor Networks

XIONG Zhe¹ JIA Jie¹ CHEN Jian^{1,2}

(School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)¹

(Key Laboratory of Medical Image Computing, Northeastern University, Ministry of Education, Shenyang 110819, China)²

Abstract Localization is a basic problem in wireless sensor networks. Traditional localization algorithms are usually based on centralized computing, which may result in high cost. For this reason, the least square method was first applied to estimate the preliminary position. Further, the localization model for all nodes based on virtual force was presented, and a virtual force based localization algorithm was proposed. By exchanging information between neighbor nodes in a distributed manner, our algorithm can effectively save localization communication cost. Finally, an update mechanism was proposed to elevate unknown node as anchor node, thus to accelerate localization process. Extensive simulations were presented to demonstrate the effectiveness of our distributed iterative localization algorithm.

Keywords Wireless sensor network, Distributed localization, Least square method, Virtual force, Update mechanism

无线传感器网络由大量集成有传感单元、通信单元和数据处理单元的节点通过自组织方式构成,具有广泛的应用前景。

在传感器网络的大多数应用中,没有与传感器节点位置相关联的数据是没有意义的^[1],而且节点定位也是无线传感器网络覆盖、路由能够顺利开展的前提。目前,已提出多种算法用于解决无线传感器网络的节点定位问题,如 DV-Hop^[2]算法、多维标度(Multi-Dimensional Scaling, MDS)^[3]方法、随机优化方法^[4-6]、基于 DV-Hop 的算法^[7]、基于 MDS 的算法^[8]、基于信号强度的算法^[9]、加权质心算法^[10,11]等。然而,当前的定位算法大都基于集中式计算,当网络规模较大时,集中式的消息交互会带来较大的网络开销。如何设计低能耗、低成本、低复杂度和高定位精度的分布式节点定位算法已成为无线传感器网络定位研究中面临的热点和难点问题。

受虚拟力模型在无线传感器网络覆盖控制与距离调节方面的启发^[13-16],本文引入虚拟力的思想用于解决节点定位问题,通过在各传感器节点上并行计算基于虚拟力作用的推

位置,提出一种基于虚拟力模型的分布式节点定位算法,并引入未知节点升级机制,能够完成无线传感器网络节点的快速准确定位。

1 网络模型

在二维监测区域中随机部署 n 个传感器节点,每个节点具有相同的通信半径,则通信范围可以近似表示为以节点位置为圆心、 R 为半径的圆。 r_{ij} 表示节点 i 与节点 j 间的欧氏距离,即

$$r_{ij} = \| p_i - p_j \| \quad (1)$$

其中, $\| x \|$ 是 2-范数操作符,当 $r_{ij} \leq R$ 时,节点 i 与节点 j 互为邻居节点,节点间测量距离为

$$d_{ij} = r_{ij} + e_{ij} \quad (2)$$

其中, e_{ij} 为测量误差。假定节点 i 和节点 j 之间的距离测量误差是相互独立的,并且都服从均值为 0、方差为 σ^2 的高斯分布,即 $e_{ij} \sim N(0, \sigma^2)$,且距离测量值为对称分布,即 $d_{ij} = d_{ji}$, $\forall i, j$ 。

到稿日期:2015-01-02 返修日期:2015-05-03 本文受国家自然科学基金项目(61402096,61173153,60903159),中央高校基本科研业务费专项资金项目(N110318001,N130504007)资助。

熊 喆(1991-),女,硕士生,主要研究方向为无线传感器网络,E-mail: xiongzhe_2015@163.com;贾 杰(1980-),女,博士,副教授,主要研究方向为无线传感器网络、无线 Mesh 网络、宽带无线通信、认知无线电等;陈 剑(1980-),男,博士,主要研究方向为移动自组织网络、无线通信等。

网络部署完成之后,所有节点首先同时广播含有节点编号、节点属性(锚节点或未知节点)以及节点自身估计坐标(当节点为锚节点时则为实际坐标)信息的报文,接收到报文之后对邻居节点的数量和信号强度进行统计来完成定位估计,通过初步定位能够得到未知节点的一个估计位置 $\hat{p}_i = (\hat{x}_i, \hat{y}_i)$,根据估计位置可以得出节点间估计距离 \hat{d}_{ij} 。

$$\hat{d}_{ij} = \begin{cases} \|\hat{p}_i - p_j\|, & \text{当节点 } j \text{ 为锚节点} \\ \|\hat{p}_i - \hat{p}_j\|, & \text{其它} \end{cases} \quad (3)$$

这样定位问题就可以转化为求测量距离 d_{ij} 与估计距离 \hat{d}_{ij} 差值平方的最小值趋向于0的问题。根据无线传感器网络随机部署的特点,本文假定节点在定位计算的初始阶段,节点间持续交互报文,并基于收到的报文内容生成邻居节点集,进而,节点能够通过报文的RSSI值估计其与邻居节点之间的测量距离 d_{ij} 。

2 基于虚拟力的分布式节点定位

为有效提高算法的收敛速度,本算法分为两阶段求解,分别是粗定位机制与分布式细粒度定位机制。

2.1 粗定位机制

在粗定位机制中,首先生成各节点的邻居集,邻居集是根据收集的信息统计出的所有邻居节点集合,并根据邻居集中的锚节点对未知节点的位置进行粗估计。对任意一个未知节点,它的邻居集会出现以下几种可能情况。

case 1:邻居集中锚节点数量为0,那么当前未知节点的估计位置尚不知道;

case 2:邻居集中锚节点数量为1,那么未知节点的估计位置可以为在以锚节点为圆心、以通信距离 R 为半径的圆内的任意一个位置;

case 3:邻居集中锚节点数量为2,那么未知节点的估计位置可以为以两个锚节点为圆心、以通信距离 R 为半径的圆的重叠区域中的任意一个位置;

case 4:邻居集中锚节点数量大于或等于3,那么可以根据最小二乘法利用所有邻居锚节点求得未知节点位置,此时,该节点可以升级为锚节点。基于多边测量最小二乘法,未知节点的当前位置可计算为:

$$s_{j,t+1} = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (4)$$

其中, $s_{j,t} \in \{(x_{i,j}^t, y_{i,j}^t) | j=1,2,\dots, |N_i|\}$,即利用节点 i 的邻居节点 j 第 t 次迭代的位置计算节点 i 的坐标, $|N_i|$ 为邻居节点数量。

$$A = -2 \times \begin{bmatrix} x_1^t - x_{|N_i|}^t & y_1^t - y_{|N_i|}^t \\ x_2^t - x_{|N_i|}^t & y_2^t - y_{|N_i|}^t \\ \dots & \dots \\ x_{|N_i|-1}^t - x_{|N_i|}^t & y_{|N_i|-1}^t - y_{|N_i|}^t \end{bmatrix}$$

$$b = \begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \dots \\ \rho_{|N_i|-1} \end{bmatrix}$$

$$\rho_i = d_{i,|N_i|}^2 - d_{i,1}^2 - (x_i^t)^2 + (x_{|N_i|}^t)^2 - (y_i^t)^2 + (y_{|N_i|}^t)^2$$

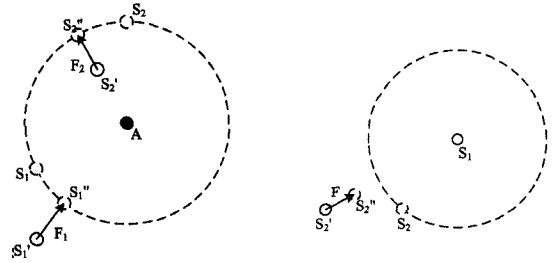
当未知节点升级为锚节点之后,其余未知节点可以根据这个节点继续更新自己收集信息的列表,当某一未知节点邻

居节点中锚节点数量增加到3个及3个以上时,就可以继续升级,逐步实现全局节点的初步定位。

2.2 分布式细粒度定位

虚拟力场(virtual potential field)最早被提出用于解决有关机器人路径规划与避障问题^[15]。即假定待规划物体受到周围环境根据某种关系产生的虚拟力的作用,通过虚拟力在物体上产生作用效果。目前,传统的虚拟力算法已经被广泛用来解决网络中节点的部署问题。

受节点利用虚拟力完成自动部署的启发,本文提出一种基于虚拟力的分布式定位算法,定义节点之间的虚拟力包括拉力和斥力。当节点间计算距离比测量距离短时,则在节点间产生斥力;当节点间计算距离比测量距离长时,则在节点间产生拉力。如图1所示,未知节点 S_1 的估计位置为 S_1' , S_1' 与锚节点 A 之间的估计距离大于测量距离,那么锚节点就对未知节点产生拉力,使未知节点与锚节点间的估计距离与测量距离相符,即移动到 S_1'' 的位置;未知节点 S_2 的估计位置为 S_2' , S_2' 与锚节点 A 之间的距离小于测量距离,这时锚节点就对未知节点产生斥力,使未知节点与锚节点间的距离与测量距离相符,即移动到 S_2'' 的位置。



(a)锚节点邻居集的受力示意图

(b)未知节点邻居集的受力示意图

图1 虚拟力示意图

令 $\hat{p}_i(t)$ 是节点 i 在时刻 t 的估计位置(如果节点 i 为锚节点,则为节点 i 的真实位置), $q_m(t)$ 为节点 i 在时刻 t 的第 m 个邻居的位置,则根据受力分析,邻居 m 对节点 i 的受力计算方式为:

$$\vec{F}_i^{(m)}(t+1) = \frac{\hat{p}_i(t) - q_m(t)}{\|\hat{p}_i(t) - q_m(t)\|} * (\|\hat{p}_i(t) - q_m(t)\| - r_m) \quad (5)$$

其中, $\frac{\hat{p}_i(t) - q_m(t)}{\|\hat{p}_i(t) - q_m(t)\|}$ 用于确定所受虚拟力的方向, $\|\hat{p}_i(t) - q_m(t)\| - r_m$ 用于确定所受虚拟力的大小。基于虚拟作用力 $\vec{F}_i^{(m)}(t+1)$ 的方向与大小,同时考虑邻居节点类型的差异,

$\hat{p}_{i,m}(t+1)$ 为节点 i 在时刻 $t+1$ 受第 m 个邻居节点作用后的位置坐标,则调整后的坐标为:

$$\hat{p}_{i,m}(t+1) = \hat{p}_i(t) + \epsilon * \frac{\hat{p}_i(t) - q_m(t)}{\|\hat{p}_i(t) - q_m(t)\|} * (\|\hat{p}_i(t) - q_m(t)\| - r_m) \quad (6)$$

其中, ϵ 为距离缩减因子,根据邻居类型的差异,具体调节方式如下。

case1:当邻居锚点为锚节点时,邻居锚点的位置不发生改变,此时距离缩减因子取值为1。当节点间的估计距离大于实际距离时,节点间产生拉力,并且将未知节点向锚节点沿两节点的连线方向移动的距离作为估计距离与实际距离的差

值;当估计距离小于实际距离时,节点间产生斥力,将未知节点沿两节点的连线相反的方向移动相同的距离。此时,基于新的位置坐标,保证两节点坐标之间的距离与测量距离相等。

case2:当邻居节点为未知位置节点时,考虑到邻居节点的位置同样发生改变,此时距离缩减因子取值为 0.5。即当估计距离大于实际距离时,节点间产生拉力,将未知的邻居节点沿两节点的连线方向移动的距离作为估计距离与实际距离差值的一半;当估计距离小于实际距离时,节点间产生斥力,将未知的邻居节点沿两节点的连线相反的方向移动相同的距离;由于两个未知坐标的节点基于作用力会产生相同的位移,可知,基于新的位置坐标,同样能够保证两节点坐标之间的距离与测量距离相等。

由于节点同时受到多个邻居节点的作用力,定义节点 i 的邻居节点集为 S_i ,节点 i 共有 M_i 个邻居节点, $t+1$ 时刻节点 i 的估计位置取多个坐标的平均值,表示为

$$\hat{p}_i(t+1) = \frac{1}{M_i} \sum_{m \in S_i} \hat{p}_{i,m}(t+1) \quad (7)$$

由于在分布式执行过程中,节点位置需要多次迭代计算。若在每次迭代中未知节点位置没有变化,即合力为 0,则可升级当前节点为锚节点。同时为了使算法能够在有限时间内完成,本算法设定结束条件是直至所有节点位置不再更新或达到最大迭代次数。实际应用中设置一个阈值 θ_h 来确定节点位置不再更新。

综上,基于虚拟力的分布式定位算法的实施过程为:

1. 设置 $t=0$;
2. while $t \leq T$
3. for 任意未知节点 s_i
4. 统计节点的锚邻居节点的数量及坐标;
5. if 锚邻居节点数量小于 1
6. 设置坐标范围为整个目标区域;
7. else if 锚邻居节点数量等于 1
8. 设置坐标范围为该锚邻居节点的通信圆覆盖区域;
9. else if 锚邻居节点数量等于 2
10. 设置坐标范围为 2 个锚邻居节点的通信圆重叠区域;
11. else if 锚邻居节点数量大于等于 3
12. 计算 s_i 的真实坐标;
13. 将 s_i 升级为锚节点;
14. break;
15. 使用虚拟力方法更新节点坐标;
16. if $d_m \leq \theta_h$
17. 将 s_i 升级为锚节点;
18. $t=t+1$;
19. end while

3 实验与性能分析

为了测试本算法的定位性能,仿真实验中采用误差值与节点通信半径的比例表示定位精度。

首先,在 $100m \times 100m$ 的正方形区域中,随机部署 15 个锚节点和 150 个未知节点,通信半径设定为 15m。实验结果如图 2 所示。

图 2(a) 示意了网络初始部署及节点之间的连接情况。其中,星号表示锚节点,圆圈表示未知节点。未知节点与锚节点间的连线表示未知节点与锚节点在一跳范围内的连接情况。由图 2(a) 可知,区域中邻居节点中锚节点数量有 3 个或 3 个以上的未知节点数量很少。大部分未知节点周围一跳内没有锚节点。图 2(b) 显示了迭代 500 次后的定位结果。加

号表示未知节点的估计位置,定位误差由虚线进行量化。从图 2 中可以看出绝大部分节点都能够准确定位,对于边缘节点同样能够准确定位。本文算法在测距误差方差为 0.05~0.10 倍通信视距的条件下,定位误差为 0.02~0.07 倍通信视距。

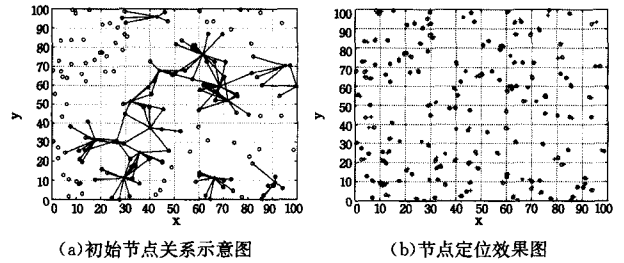


图 2 节点初始分布及定位结果示意图

在 $100m \times 100m$ 区域内随机部署 150 个节点,通信半径为 15m,将本文算法与典型的定位算法 DV-Hop 算法、MDS-MAP 算法进行性能对比,实验结果均为计算 50 次后的平均误差,如图 3 所示。其中,DV-Hop 算法基于跳数求出锚节点与未知节点的距离,然后用三边测量法进行节点定位。MDS-MAP 算法通过多维标度方法进行节点间定位。从图 3 可以看出,在本文所提的算法中,锚节点越多,未知节点在定位过程中得到的估计位置越接近于其实际位置,定位未知节点的位置越准确;MDS-MAP 采用最小跳数方法来计算任意两个节点间的距离,导致了较大的定位误差;DV-Hop 在与锚节点距离估计过程中存在较大的误差,使其定位效果最差。

进一步,在 $100m \times 100m$ 区域内随机部署 100~200 个节点,其中锚节点比例设定为未知节点数量的 10%,考察不同节点规模时算法的性能情况,实验结果如图 4 所示。从图 4 中可以看出,未知节点数量越多,定位算法产生的平均误差越小。由于锚节点所占比例不变,对于本文所提算法而言,节点数量增加带来的是锚节点数量增加,可以确定位置的未知节点数量同时增加,因此有效提高了未知节点的定位精确度,本文所提算法的实验结果优于 DV-Hop 与 MDS-MAP 算法。

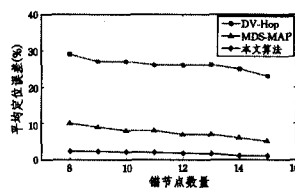


图 3 锚节点数量与平均定位误差曲线

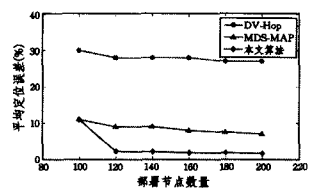


图 4 不同节点规模与平均定位误差曲线

结束语 本文研究了无线传感器网络的分布式定位问题,提出一种基于虚拟力的节点定位算法。大量仿真结果表明,本文所提算法能够实现无线传感器节点的迅速、有效定位,在密度高、锚节点少的环境中同样表现良好,具有较好的可扩展性。

参考文献

[1] Wang Fu-bao, Shi Long, Ren Feng-yuan. Self-localization system and algorithm in wireless sensor networks [J]. Journal of Software, 2005, 16(5): 857-868 (in Chinese)
王福豹,史龙,任丰原. 无线传感器网络中的自身定位系统和算法[J]. 软件学报, 2005, 16(5): 857-868

[2] Niculescu D, Nath B. DV Based Positioning in Ad Hoc Networks [J]. Telecommunication Systems, 2003, 22(1): 267-280

- [3] Shang Yi, Ruml W, Zhang Ying, et al. Localization from connectivity in sensor networks [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2004, 15(11): 961-974
- [4] Vecchio M, López R, Marcelloni F. A two-objective evolutionary approach based on topological constraints for node localization in wireless sensor networks [J]. Applied Soft Computing, 2012, 15(7): 1891-1901
- [5] Diana M, Javier D S, Sergio G, et al. On the design of a novel two-objective harmony search approach for distance- and connectivity-based localization in wireless sensor networks [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2013, 26(2): 669-676
- [6] Kannan A A, Mao G, Vucetic B. Simulated annealing based wireless sensor network localization with flip ambiguity mitigation [C]// Proceedings of the 63rd IEEE Vehicular Technology Conference, 2006. Melbourne, Australia: IEEE Press, 2006: 1022-1026
- [7] Zhang Wei, Peng Li, Zhao Long. Aitken Iterative method used in the node positioning for wireless Sensor Network [J]. Mini-micro Systems, 2012, 33(2): 330-333 (in Chinese)
张炜, 彭力, 赵龙. Aitken 迭代法在无线传感器网络节点定位中的应用 [J]. 小型微型计算机系统, 2012, 33(2): 330-333
- [8] Chaurasiya V K, Jain N, Nandi G C. A novel distance estimation approach for 3D localization in wireless sensor network using multi dimensionalscaling [J]. Information Fusion, 2014, 15(1): 5-18
- [9] Priyadarshini K J, Ganesh A B. Improvisation of localization Algorithm for wireless sensor networks [J]. Procedia Engineering, 2012, 38(6): 1186-1191
- [10] Liu Yun-jie, Jin Ming-lu, Cui Cheng-yi. Modified weighted centroid localization algorithm based on RSSI for WSN [J]. Journal of Transduction Technology, 2010, 23(5): 717-721 (in Chinese)
刘运杰, 金明录, 崔承毅. 基于 RSSI 的无线传感器网络修正加权质心定位算法 [J]. 传感技术学报, 2010, 23(5): 717-721
- [11] Zhao Ji-jun, Zhao Qing-wei, Li Zhi-hua, et al. An improved Weighted Centroid Localization algorithm based on difference of estimated distances for wireless sensor networks [J]. Telecommunication Systems, 2013, 53(1): 25-31
- [12] Nabil D, Otman B. Modeling the impact of observation conditions on localization systems [J]. Information Fusion, 2014, 15(1): 19-31
- [13] Han Y-H, Kim Y-H, Kim W-T, et al. An energy-efficient self-deployment with the centroid-directed virtual force in mobile sensor networks [J]. Simulation, 2012, 88(10): 1152-1165
- [14] Xu Qin, Wang Xu, Sun Wen-yuan. Virtual force oriented covering optimization strategy in wireless sensor networks [J]. Computer Engineering and Design, 2012, 33(3): 890-894 (in Chinese)
徐琴, 王旭, 孙文远. 虚拟力导向的无线传感器网络覆盖策略 [J]. 计算机工程与设计, 2012, 33(3): 890-894
- [15] Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobilerobots [J]. International Journal of Robotics Research, 1986, 5(1): 90-98
- [16] Zou Yi, Chakrabarty K, Krishnendu C. Sensor deployment and target localization based on virtual forces [C]// Proceeding of the IEEE INFOCOM 2003. California: IEEE press, 2003: 1293-1303
- [17] Zhu Shou-hong, Ding Zhi-guo. Distributed Cooperative Localization of Wireless Sensor Networks with Convex Hull Constraint [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(7): 2150-2161

(上接第 108 页)

- [8] Jiang Ju-lang, Zhang You-sheng, Xue Feng, et al. Local Histogram Equalization with Brightness Preservation [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(5): 861-866 (in Chinese)
江巨浪, 张佑生, 薛峰, 等. 保持图像亮度的局部直方图均衡算法 [J]. 电子学报, 2006, 34(5): 861-866
- [9] Song Shu-Lin, Zhang Yan, Wang Xian, et al. Illumination processing method based on Curvelet transform and Retinex [J]. Computer Engineering and Applications, 2013, 49(3): 171-173 (in Chinese)
宋书林, 张彦, 王宪, 等. 基于曲波变换和 Retinex 人脸光照处理算法 [J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(3): 171-173
- [10] Li Fu-wen, Jin Wei-qi, Chen Wei-li, et al. Global Color Image Enhancement Algorithm Based on Retinex Mode [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2010, 30(8): 947-951 (in Chinese)
李福文, 金伟其, 陈伟力, 等. 基于 Retinex 模型的彩色图像全局增强算法 [J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(8): 947-951
- [11] Yan Jun-xuan, Zhang Ke. HSI space based on luminance information in multi-Scale Retinex image enhancement algorithm [J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(23): 31-33 (in Chinese)
闫骏宣, 张科. HSI 空间亮度信息的多尺度 Retinex 图像增强研究 [J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(23): 31-33
- [12] Wu Zhuang-zhi, Qi Li-na, Luo Pei. A Retinex Image Processing Framework Based on Estimation of Piecewise Smooth Illumination [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2011, 33(3): 83-88 (in Chinese)
吴壮志, 齐立娜, 骆沛. 基于分片光滑照度估计的 Retinex 图像处理框架 [J]. 国防科技大学学报, 2011, 33(3): 83-88
- [13] Cheng Yong, Hou Ying-kun, Zhao Chun-xia, et al. Robust face recognition based on illumination invariant in nonsubsampling Contourlet transform domain [J]. Neurocomputing, 2010, 73(10): 2217-2224
- [14] Sun J G, Li Y, Meng X F, et al. Improved monoscale Retinex and application in face recognition [J]. Application Research of Computers, 2011, 28(12): 4790-4793 (in Chinese)
孙劲光, 李扬, 孟祥福, 等. 改进的单尺度 Retinex 及其在人脸识别中的应用 [J]. 计算机应用研究, 2011, 28(12): 4790-4793
- [15] Ge Wei, Li Gui-ju, et al. Face image illumination processing based on improved Retinex [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(4): 1011-1020 (in Chinese)
葛微, 李桂菊, 等. 利用改进的 Retinex 进行人脸图像光照处理 [J]. 光学精密工程, 2010, 18(4): 1011-1020
- [16] Vu N, Caplier A. Illumination-robust face recognition using retina modeling [C]// 16th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). 2009: 3289-3292
- [17] Elad M. On the bilateral filter and ways to improve it [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 11(10): 1141-1151
- [18] Fan Chun-nian, Zhang Fu-yan. Illumination Invariant Extracting Algorithm Based on Nonsubsampling Contourlet Transform [J]. Signal Processing, 2012, 28(4): 507-513 (in Chinese)
范春年, 张福炎. 基于非下采样 Contourlet 变换的光照不变量提取算法 [J]. 信号处理, 2012, 28(4): 507-513