

多级异构无线传感器网络高效多跳分簇路由算法

胡中栋,伍华林,王振东

(江西理工大学信息工程学院,江西赣州 341000)

摘要:在无线传感器网络中开发一个高效节能的路由算法需要充分利用有限的能量。针对现有异构无线传感器网络分簇路由算法未考虑节点距离基站的位置,以及在路由传输方面多是采用单跳路由机制,从而造成能量空洞等问题。文中将提出一种多级异构无线传感器网络高效多跳分簇路由算法,该算法将节点位置与剩余能量作为考虑因素来选举簇头,增加距离基站近且剩余能量高的节点被选举为簇头的机率,同时采用多跳与单跳相结合的自适应路由通信机制,均衡全网能耗、提高全网能效。理论和仿真实验结果表明该算法在存活节点和网络吞吐量等性能方面优于现有算法。

关键词:无线传感器网络;多级异构;节点位置;剩余能量;多跳

中图分类号:TP393

文献标识码:A

文章编号:1002-1841(2017)09-0103-06

Energy-efficient Multi-hop Clustering Routing Algorithm for Multi-level Heterogeneous Wireless Sensor Networks

HU Zhong-dong, WU Hua-lin, WANG Zhen-dong

(School of Information Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract:In wireless sensor networks (WSNs), design an energy-efficient routing algorithm needs to take full advantage of the limited energy. Due to the current cluster routing algorithms for heterogeneous wireless sensor network did not consider the node location and adopt single hops routing mechanism in the routing transmission that caused energy holes and other issues, in this paper, an energy-efficient multi-hop clustering routing algorithm for multi-level heterogeneous wireless sensor networks was proposed, which combines with the node locations and the residual energy to improve the cluster-head election mechanism. It can increase the probability of the node close to the base station and high residual energy to be the cluster-head. What's more, it adopted an adaptive routing communication mechanism that balanced the network energy consumption and improved the whole network energy efficiency. Theoretical results and simulation manifest that the new algorithm outperforms the present algorithms in nodes alive and network throughput.

Keywords:wireless sensor networks; multi-level heterogeneous; node locations; residual energy; multi-hop

0 引言

近年来无线传感器网络技术已经成为热门研究之一,通过在特定区域部署传感器节点收集数据并发送到基站^[1]。传感器节点初始能量随机分配,但是节点部署好后很难给节点添加能量,因此节约能量非常重要。分簇是一种重要的方法,簇群结构能够有效地聚合数据,从而实现网络负载均衡^[2]。分簇就是在网络中选择一部分节点作为簇头,并将所有的节点合理地分配到各个簇头内。由于短距离无线电通信与实际消耗的能量正比于距离的平方,因此多跳路由通信比直接与基站通信更加节约能量^[3-5]。

异构(heterogeneous)无线传感器网络

(HWSNs)是指组成网络的传感器节点的类型不同。HWSNs中有些节点会相对早些死亡,为了不影响网络的运行延长网络运行周期,则需要添加新的无线传感器节点,新添加的节点将拥有更充足的能量。同时网络在无线通讯的过程中出现短暂的链路失败或者是地形的特点等因素的影响,每个传感器节点消耗的能量不可能都一样,WSNs就呈现出一种能量异构的特点,因此本文将具有该特点的网络为称多级异构无线传感器网络。

现有的无线传感器路由算法都只是各自适应于不同要求的不同的应用当中。一般路由算法可分为2类:基于网络结构^[6],基于协议操作^[7]。基于网络结构算法进一步可划分为平面、层次和基于位置的路由。而基于位置的路由算法又可继续划分为基于协

商、查询、多路径、一致性和 QoS 的路由^[8]。

本文在 DEEC^[9] 算法的基础上, 提出多级异构无线传感器网络高效多跳分簇路由算法 MEECR (energy-efficient multi-hop clustering routing algorithm for multi-level heterogeneous wireless sensor networks), 该算法的主要改进思路如下:

(1) 改进簇头选举机制。在多级异构网络环境下根据节点的位置信息和剩余能量来选簇头, 提高能量高并且离基站近的节点选为簇头的机率, 减少离基站远的节点选为簇头的数量, 从而减少网络在传递数据上的能量消耗。

(2) 改进数据通信机制。在数据传输阶段采用自适应路由通信的方式。在数据传输阶段比较簇头到基站的距离, 若节点距离基站较远则采用多跳路由, 依据簇间距离、簇头到基站的距离和簇头剩余能量计算簇头的决策值, 然后选择其他簇头与该簇头决策值最大值, 那么这个节点将作为该簇头的下一跳节点。若节点距离基站较近则采用单跳路由, 节点直接传输数据到基站。

1 相关工作

LEACH^[10] 路由算法就是一种经典的基于网络结构的层次路由算法, 它采用的是随机分簇和周期性轮选簇头方法。但是 LEACH 路由算法在数据传输阶段, 簇头以单跳通信的方式将融合后的数据直接传输给基站, 而这会造成距离基站远的簇头节点会消耗更多的能量。HEED^[11] 是一种类似于 LEACH 的分布式分簇算法, 只是 HEED 算法在竞选簇头的概率中加入了节点当前剩余能量这一因素, 从而使得能量高的节点在簇头选举时被选为簇头的机率更大。但是, 在多级异构无线传感器网络中, 这些算法都很难适用, 并且与基站通信的方式采用的是单跳路由通信的方式。SEP^[12] 是一种二级异构 WSNs 路由算法, 该算法初始阶段节点的初始能量有两类, 因此具有两类不同的簇头选举概率, 从而增长了首节点的死亡时刻。但是 SEP 只适用于二级异构无线传感器网络, 并且该算法在数据通信方面采用也是单跳路由的方式。

董国勇等人利用蚁群算法优化 WSNs 非均匀分簇路由算法^[13], 它主要是依据节点剩余能量、节点稀疏程度等因素使得簇头的选择最优, 并且确定簇的大小。同时将优化过后的蚁群算法运用到节点路由通信中, 从而选择最优路径完成簇头间通信。但是在异构网络中性能表现不是很好。由尚凤军等人提出的

WSNs 分布式多跳路由算法^[14], 它在成簇阶段根据时间延迟机制解决了能量相同节点在产生簇头时的碰撞问题, 在数据传输阶段将网络中的簇头构造成一棵路由树, 通过这棵路由树进行多跳路由通信, 以降低在数据通信上的能耗。但是只是应用在同构网络环境中。

DEEC 算法是一种多级 HWSNs 分簇算法, 该算法形成的网络中的节点轮流当选为簇头, 由于节点初始能量不同, 节点被选举为簇头的机率不同, 并且该机率会随着该节点剩余能量变化而变化。但是 DEEC 算法在数据传输阶段传输方式采用的是单跳路由的方式, 因此当簇头距离基站较远时就需要消耗更多的能量, 从而造成能量的浪费。

DEEC 路由算法也是在 LEACH 路由算法基础上进行改进的, 只是 DEEC 节点初始能量不同, 因此节点选为簇头的概率也不相同。DEEC 路由算法中每个节点 s_i 在每轮用于选举为簇头的阈值函数为

$$T(s_i) = \begin{cases} \frac{p_i}{1 - p_i(r \bmod \frac{1}{p_i})}, & \text{if } s_i \in G \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

式中: G 为 $1/p_i$ 轮中未被选举为簇头节点的集合; p_i 为节点 s_i 被选举为簇头的概率; r 为当前轮数。

DEEC 算法没有考虑簇头节点的位置的影响, 若距离基站比较远的簇头将会消耗更多的能量, 因此会过早死亡, 从而造成全网能量消耗不均衡。

2 多级异构无线传感器网络高效多跳分簇路由算法

MEECR 算法是在多级异构无线传感器网络环境下设计的, 在簇头选举时综合考虑节点距离基站的位置和节点剩余能量的影响, 改进选举簇头的阈值函数, 增大距离基站近且剩余能量高的节点选为簇头的机率; 在数据传输阶段, 采取自适应的路由通信机制, 若簇头距离基站较远则采用多跳路由, 若距离基站较近则选择直接与基站进行通信, 有效地利用有限的能量。

在本文中我们考虑网络中有 N 个节点, 节点随机地部署在 $M \times M$ 的区域内, 并假设基站位于网络区域的中间, 其中每个节点都知道网络中其他节点的信息。

2.1 MEECR 路由算法基本流程

MEECR 路由算法是按轮运行, 每一轮包括簇群建立阶段和稳定传输阶段。基本流程如下:

Step1 每轮开始之前统计节点的总能量,并纪录节点当前的剩余能量,再依据节点的剩余能量计算该节点选举为簇头的平均概率。

Step2 依据改进的簇头选举阈值函数计算出该节点簇头选举的阈值,然后与该节点的平均概率比较判断该节点是否能成为簇头,若节点当选簇头转到 Step4,否则转到 Step3。

Step3 若节点该轮未能成为簇头,则选择加入相应的簇群,然后节点将采集到的数据发送到簇头。

Step4 簇头节点则将成员节点发送来的数据进行汇聚、融合,并根据其他簇头广播的信息计算决策值。然后让节点到基站的距离与一个距离阈值进行比较,若大于距离阈值,则进行多跳传输,在多跳传输时选择决策值最大的簇头节点作为下一跳节点。若小于距离阈值,则与基站直接建立通信关系。

Step5 网络进入稳定阶段。一定时间后重新开始新一轮,并判断有无节点死亡。

2.2 MEECR 路由算法簇头选举机制

本文综合考虑节点位置和剩余能量因素以及数学推导得到新的簇头选举的阈值函数:

$$T_1(s_i) = \begin{cases} \frac{W_b p_i}{1 - p_i(r \bmod \frac{1}{p_i})}, & \text{if } s_i \in G \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

$$W_b = A \frac{E_i(r)}{E(r)} + B[1 - \exp(-\frac{d_{avg}}{d(i)})] \quad (3)$$

式中: A 和 B 为控制因子,其取值范围为 $[0, 1]$,且 A 和 B 之和为 1; d_{avg} 为全网节点到基站的平均距离; $E_i(r)$ 为节点 s_i 在第 r 轮的剩余能量; $E(r)$ 为网络在第 r 轮的平均能量。

由于本文假设节点均匀分布,因此可以得到全网中的节点到基站的距离的平均值为

$$d_{avg} = 0.765 \times \frac{M}{2} \quad (4)$$

MEECR 算法在每轮选举出的簇头数量有限,因此通过计算可以得出每轮最优的簇头数 k_{opt} 为

$$k_{opt} = \frac{M \sqrt{NE_{fs}}}{\sqrt{2(E_{mp}d_{avg}^4 - E_{tx} - E_{da})}} \quad (5)$$

为了知道每个节点的平均能量,因此需要估计 WSNs 的生存周期。在理想情况下,WSNs 区域内所有的节点近乎在同一时刻死亡,也就是在每一轮的能耗

E_{round} 都是同样的,于是得到全网生存周期的估计值:

$$R = \frac{E_{total}}{E_{round}} \quad (6)$$

式中: E_{total} 为全网节点初始的总能量; E_{round} 为每一轮全网所消耗的总能量。

假设每个节点能耗均匀,也即是说,每个无线传感器节点在每一轮所耗费的能量是一致的。于是得到第 r 轮节点的平均能量 $\bar{E}(r)$ 为

$$\bar{E}(r) = E_{total} \frac{1}{N} (1 - \frac{r}{R}) \quad (7)$$

依据节点的平均能量和节点的剩余能量可以得到多级异构无线传感器网络节点选举为簇头的平均概率为

$$p_i = \frac{N(1 + \alpha_i)E_i(r)}{(N + \sum_{i=1}^N \alpha_i)\bar{E}(r)} p_{opt} \quad (8)$$

式中: α_i 为多于 E_0 的能量倍数; p_{opt} 为优化簇头比例。

当节点 s_i 选举簇头的阈值 $T_1(s_i)$ 增大时,那么节点 s_i 被选举为簇头的机率也随之增大;反之,若节点 s_i 选举簇头的阈值 $T_1(s_i)$ 较小时,则节点 s_i 被选举为簇头的机率也随之减小。由公式可知在簇头选举的过程中节点距离基站较近并且剩余能量较高,则阈值 $T_1(s_i)$ 增大,节点被选为簇头的机率就越高,离基站较远的节点成为簇头的机率就越小。

如上所述,MEECR 算法的簇头选举机制增大了剩余能量高且离基站近的节点选举簇头的阈值,从而增加了剩余能量高且离基站近的节点选为簇头的机率。因此尽可能地减少了距离基站远的节点选为簇头的数目,避免分布在区域边缘的簇头过多,导致簇头能量消耗过快而死亡,从而减少了网络能量的消耗,增加了可用节点的数量。

2.3 MEECR 路由算法簇间通信机制

在 MEECR 算法中,设计了一种自适应的路由通信机制。依据一个阈值判断簇头距离基站是远或者是近。当簇头距离基站远时,则采用多跳路由的方式,依据簇头间的距离、簇头到基站的距离和簇头的剩余能量计算该簇头与其他簇头之间的决策值,选择值最大的簇头作为下一跳。当簇头距离基站较近时,该簇头节点直接将数据发送到基站,从而做到多跳路由与单跳路由相结合的路由通信机制。

文中采用与文献[10]类似的能量耗散模型,假定功率放大器采用不同模型时的距离阈值为 d_0 。为了

实现一个可接受的信噪比在发送 L-bit 数据距离为 d 时,广播中所消耗的能量是:

$$E_{tx}(L,d)=\begin{cases} LE_{elec}+LE_{fs}d^2 & d<d_0 \\ LE_{elec}+LE_{mp}d^4 & d\geq d_0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: E_{elec} 为射频电路消耗的能量, E_{elec} 取决于许多因素,如数字编码、调制、滤波; E_{fs} 和 E_{mp} 取决于发射机放大器模型; d 为发送者与接收者之间的间距。

在实验中,无论是自由空间(d^2)还是多路径衰落(d^4)的信道模型,都是根据发射器和接收器之间的距离来决定,若距离小于值 d_0 ,采用自由空间模型。否则,采用多路径衰落模型。

本文设定判断簇头距离基站的远近的距离阈值为

$$d_h=\beta d_0 \quad (10)$$

式中 β 表示 0 到 1 之间的数,因为若 d_h 大于 d_0 ,那么采用的是多路径衰落模型,广播中所消耗的能量将是 d_h 的 4 次方,明显消耗更多的能量,因此 d_h 会小于 d_0 。

本文设定簇头 i 与簇头 j 之间的决策值函数为

$$W_n(i)=\frac{E_{res}(j)}{E_{res}(i)}+\frac{2\times d(ch_i,bs)}{d(ch_i,ch_j)+d(ch_j,bs)} \quad (11)$$

式中: $d(ch_i,ch_j)$ 为簇头 i 与簇头节点 j 之间的距离; $d(ch_i,bs)$ 为簇头节点 i 与基站之间的距离; $d(ch_j,bs)$ 为簇头节点 j 与基站之间的距离; $E_{res}(i)$ 为簇头 i 的剩余能量; $E_{res}(j)$ 为簇头 j 的剩余能量。

在数据传输的初始阶段,各簇头向网络中广播节点本身的信息包。信息包中包含了该簇头节点的剩余能量和到基站的距离,具体格式如表 1 所示。

表 1 簇头 i 的广播信息包

节点标示号	剩余能量/J	与基站间的距离/m
ID_i	$E_{res}(i)$	$d(ch_i,bs)$

各簇头记录其他簇头广播的数据,并且依据簇头接收到广播信号的强度计算得到与相应的簇头之间的距离,从而建立簇头之间的信息表,簇头 i 存储的簇头之间的信息表如表 2 所示。

表 2 簇头 i 的节点信息表

节点标示号	剩余能量/J	与其他簇头间的距离/m	与基站间的距离/m
ID_i	$E_{res}(j)$	$d(ch_i,ch_i)$	$d(ch_i,bs)$
ID_k	$E_{res}(k)$	$d(ch_i,ch_k)$	$d(ch_k,bs)$
...
ID_n	$E_{res}(n)$	$d(ch_i,ch_n)$	$d(ch_n,bs)$

选用何种通信方式的机制设计如下:

(1) 若簇头与基站的距离 $d(ch_i,bs)$ 大于阈值 d_h ,则依据簇头之间的信息表计算出与其他簇头节点之间的决策值,并选择决策值最大的簇头作为下一跳路由。如果存在两个或多个决策值相同的簇头节点,则选择 ID 较大的那个簇头节点作为下一跳。

(2) 若簇头到基站的距离 $d(ch_i,bs)$ 小于阈值 d_h ,那么该簇头采用单跳路由的方式,也即簇头直接发送数据到基站。

综上所述,MEECR 算法采用多跳与单跳相结合的路由通信机制,既能让距离基站远一些的簇头通过多跳路由的方式减少能量消耗,又能让距离基站近的簇头直接发送数据到基站,节约节点能量在通信上的消耗,从而使得节点有限的能量能够充分利用。

3 算法仿真与分析

3.1 仿真参数设置

本文采用 MATLAB 软件对 MEECR 算法进行仿真。仿真无线传感器网络环境是在一个长宽均为 100 m 的地区内随机均匀地分布有 100 个无线传感器节点。假定基站位于区域的正中间。为了与其他的协议进行对照,忽略无线信道干扰和信号碰撞等随机因素产生的影响。仿真参数见表 3。

表 3 仿真参数

参数	单位	参数值
网络范围	m	(0,0)~(100,100)
基站位置	m	(50,50)
节点数量		100
初始能量	J	0.5
数据包	bit	4 000
P		0.05
E_{tx}	nJ•bit ⁻¹	50
E_{rx}	nJ•bit ⁻¹	50
E_{da}	nJ•bit ⁻¹	5
E_{fs}	pJ•bit ⁻¹ •m ²	10
E_{mp}	pJ•bit ⁻¹ •m ⁴	0.001 3

距离阈值 d_h 中的 β 为 0.25 时实验效果最佳。其中在实验中 A 为 0.4, B 为 0.6。

MEECR 算法在某轮节点随机分布图如图 1 所示,基站位于中心,空心圈表示普通节点,点圈则表示簇头节点。

3.2 仿真结果分析

实验分别在二级异构无线传感器网络和多级异构无线传感器网络环境下比较 MEECR、DEEC 和 SEP 算法的网络生存周期和网络吞吐量来验证算法的效

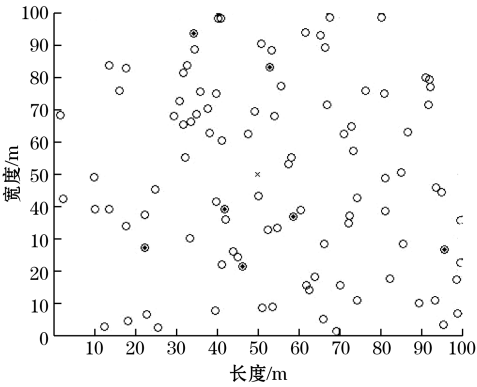


图 1 节点分布图

率。

3.2.1 网络生存周期

网络生存周期表示全网存活节点随网络运行变化而变化,是一项重要的指标,能更加直观地比较不同算法存活节点的变化。

从图 2 中可以看出在二级异构无线传感器网络中 MEECR 算法生存周期要比 SEP 算法稍微好一些,与 DEEC 算法的生存周期很接近。而从图 3 存活节点变化图中可以看出,在多级异构无线传感器网络环境中 MEECR 算法出现首个节点死亡的时间明显要比 SEP 算法出现首个节点死亡的时间更晚。MEECR 算法出现首个节点死亡是在 1544 轮而 DEEC 算法首节点死亡出现在 1455 轮,因此 MEECR 的稳定周期比 DEEC 获得了大约 6% 的提高,在大部分相同时刻 MEECR 算法与 DEEC 和 SEP 算法相比存活节点数目要更多。由图 2 和图 3 可知在多级异构网络环境中节点的生存周期要比在二级异构网络更长。

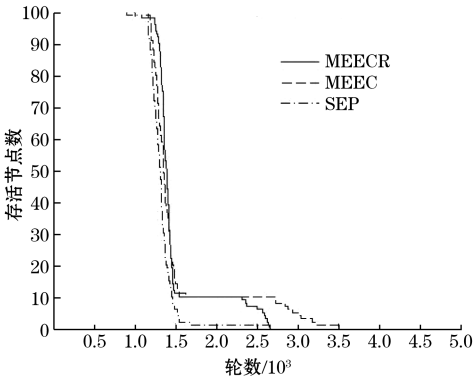


图 2 二级异构网络存活节点数量变化

MEECR 算法改进了簇头选举机制,从而减少了部分节点因能耗过快而失效的数量,减少每轮网络能量的消耗,提高了节点存活时间。

3.2.2 网络吞吐量

网络吞吐量表示网络节点给基站发送的数据的
数量。 万方数据

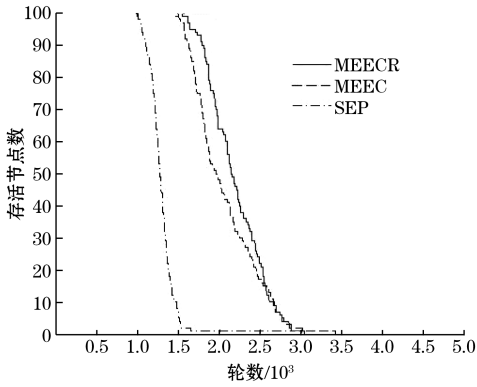


图 3 多级异构网络存活节点数量变化

由图 4 可知在二级异构无线传感器网络环境下 MEECR 和 DEEC 算法传输的数据要比 SEP 算法多很多, MEECR 算法比 DEEC 算法传输的数据也要多一些。而由图 5 能够看出在多级异构网络环境中 MEECR 路由算法总共发送的数据包明显多余 DEEC 和 SEP 算法。并且由图 4 和图 5 可知多级异构网络环境下这些算法传输的数据要比在二级网络环境下要多。

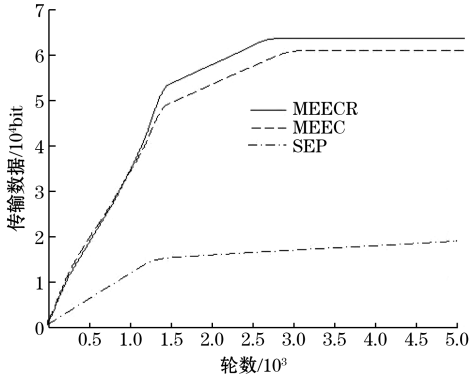


图 4 二级异构网络吞吐量

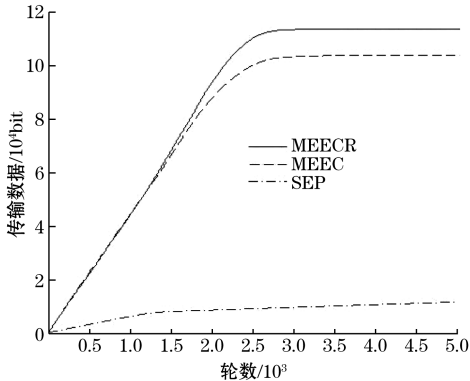


图 5 多级异构网络吞吐量

这主要是因为簇头选举时考虑了节点位置以及剩余能量,使得距离基站近且能量高的节点成为簇头的概率更大,避免簇头节点分布在距离基站较远的区域过多而过早死亡造成能量空洞等问题。同时采用单跳与多跳路由相结合的路由机制,使得全网节点

能够发送更多的数据到基站。从而使得全网能量效率得到提升。

4 结束语

在异构无线传感器网络环境下的现有分簇算法并未考虑节点位置对网络生存时间的影响。本文提出一种多级异构无线传感器网络高效分簇路由算法,该算法改进了簇建立过程中簇头选举的阈值函数,同时在传输数据阶段采用自适应的路由通信机制,根据节点位置来选择路由方式,在多跳方式中依据节点位置和剩余能量来选择簇头的下一跳。理论分析和仿真结果表明,相比 DEEC、SEP、MEECR 算法在网络生存周期和网络吞吐量上 MEECR 算法有明显的提升,MEECR 算法的性能更优,能充分利用有限的节点能量,有效地均衡了无线传感器网络的能耗,从而使得网络的生存周期得以延长。

参考文献:

- [1] 冯亚超,贺康,杨红丽,等. 一种无线传感器网络数据收集协议的研究与优化[J]. 传感技术学报,2014,27(3): 355-360.
- [2] 陆亚芳,易可夫,冯绪,等. 基于模糊理论的无线传感器网络多层分簇式路由算法[J]. 传感技术学报,2014,27(7):933-938.
- [3] GHOSH A K, BAIRAGI A K, KASHEM M A, et al. Energy efficient zone division multihop hierarchical clustering algorithm for load balancing in wireless sensor network [J]. International Journal of Advanced Computer Science & Application, 2011, 2(12): 92-97.
- [4] JAVAID N, QURESHI T N, KHAN A H, et al. EDDEEC: enhanced developed distributed energy-efficient clustering for heterogeneous wireless sensor networks [J]. Procedia computer science, 2013(19): 914-919.
- [5] ELHOSENY M, YUAN X, YU Z, et al. Balancing energy consumption in heterogeneous wireless sensor networks using genetic algorithm [J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(12): 2194-2197.
- [6] 孙彦景,林昌林,江海峰. 一种能量高效的分布式非均匀分簇路由算法[J]. 传感技术学报,2015,28(8):1194-1200.
- [7] 余敏,李雅晴,张琦,等. 基于节点密度加权的 T-LEACH 三维动态路由协议研究[J]. 传感技术学报,2016,29(2):278-284.
- [8] 于森,白光伟,沈航,等. 多力驱动的无线传感器网络 QoS 路由协议[J]. 传感技术学报,2013,26(11):1564-1572.
- [9] LI Q, ZHU Q, WANG M. Design of a distributed energy-efficient clustering algorithm for heterogeneous wireless sensor networks [J]. Computer Communications, 2006, 29(12): 2230-2237.
- [10] HEINZELMAN W R, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks [J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2002, 1(4):660-670.
- [11] YOUNIS O, FAHMY S. HEED: A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for Ad Hoc sensor Networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2004, 3(4):366-379.
- [12] SMARAGDAKIS G, MATTIA I, BESTAVROS A. SEP: A stable election protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks [J]. Proceeding of 2nd International Workshop on Sensor and Actor Network Protocol and Applications (SANPA), 2004.
- [13] 董国勇,彭力,吴凡,等. 一种采用蚁群优化的 WSN 能量均衡非均匀分簇路由算法[J]. 小型微型计算机系统,2015,36(7):1565-1568.
- [14] 尚凤军,任东海. 无线传感器网络中分布式多跳路由算法研究[J]. 传感技术学报,2012,25(4):529-535.

作者简介:胡中栋(1958—),教授,主要研究方向为无线传感器网络,智能计算。E-mail:jxhzd@163.com
伍华林(1991—),硕士,主要研究方向为无线传感器网络,智能计算。E-mail:wuhualin18@163.com

(上接第 71 页)

- [9] CREMERS D, ROUSSON M, DERICHE R. A review of statistical approaches to level set segmentation: integrating color, texture, motion and shape [J]. International Journal of Computer Vision, 2007, 72(2): 195-215.
- [10] RELL P S, DOOLEY L S, WONG P. Efficient Image Registration Using Fast Principal Component Analysis. Department of Communication and Systems [J]. The Open University, Milton Keynes, United Kingdom, IEEE, 2012: 1661-1664.
- [11] 龚爱平. 基于嵌入式机器视觉的信息采集与处理技术研究[D]. 浙江:浙江大学,2013.
- [12] 孟斌,吴宏鑫. 黄金分割控制的收敛性和稳定性研究[J]. 宇航学报,2009(5):2128-2132.

作者简介:楚启超(1990—),硕士研究生,主要研究领域为嵌入式系统和机器视觉。E-mail:1154540702@qq.com

通讯作者:吴建国(1955—),教授,硕士生导师,主要研究领域为流程工业企业综合自动化、复杂生产过程系统的先进控制技术研究与应用。

E-mail:wu.jg@ntu.edu.cn