

## ファジィ理論による隣接ノード数を考慮した クラスタヘッド決定システム

阿武 純平<sup>†</sup>, バロリ レオナルド<sup>††</sup>

<sup>†</sup> 福岡工業大学大学院工学研究科情報通信工学専攻

<sup>††</sup> 福岡工業大学情報工学部情報通信工学科

**あらまし** センサネットワークにおけるセンサ端末の電力源は有限であり、物理的な電源管理が困難なため、電力効率のよい通信システムの設計が必要とされている。そこで、本稿ではファジィ理論を用い、消費電力の均一化に優れたクラスタヘッドの決定を行うシステムを提案する。提案手法では、従来手法で用いられているトラフィックの代わりに隣接ノード数を考慮することでより少ないクラスタヘッド数でクラスタを構成することが可能となる。また、シミュレーションを行った結果、提案手法は従来手法より消費電力の均一化において有効であり、ネットワークの長期的な稼動が期待できることがわかった。

## A Fuzzy-based Cluster Head Decision System Considering Number of Neighbor Nodes

Junpei ANNO<sup>†</sup>, Leonard BAROLLI<sup>††</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Engineering, Fukuoka Institute of Technology (FIT)

E-mail: mgm07001@bene.fit.ac.jp

<sup>††</sup> Department of Information and Communication Engineering, FIT

E-mail: barolli@fit.ac.jp

**Abstract** Cluster formation and cluster head selection are important problems in sensor network applications and can drastically affect the network's communication energy dissipation. However, selecting of the cluster head is not easy in different environments which may have different characteristics. In this paper, in order to deal with this problem we propose a power reduction algorithm for sensor networks based on fuzzy logic and number of neighbor nodes. We evaluate the proposed system by simulations and show that proposed system makes a good selection of the cluster head.

### 1 はじめに

近年の MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) や無線通信技術の発展により、安価で小型かつ消費電力の小さいセンサ端末が実現し、無線センサネットワークの応用範囲が広がっている。無線センサネットワークは、元々軍事目的に開発されたものであるが、軍事利用以外の用途でもその潜在的な価値は評価され、医療・環境・日常生活におけるセキュリティといった様々な分野において、その有効的な活用方法が検討されている。

センサネットワークは数百から数万という数のセンサ端末から構成され、火山・海中・砂漠・宇宙といった人間が容易に立ち入れない場所などに構築される可能性があり、物理的な電源管理が困難である。また、センサ端末の小型化に伴い、バッテリーの容量はより制限されるため、長期的な観測を行うための手法は重要な研究課題となっている。センサ端末の

情報送信による消費電力は通信距離の 2 乗に比例するため<sup>1)</sup>、近接するセンサ端末同士でクラスタを形成し、クラスタヘッドと呼ばれる代表センサ端末がクラスタ内の情報を集約し、基地局へ送信するクラスタリングという手法が省電力化において有効である。クラスタヘッドは他のセンサ端末よりも消費電力が大きく、クラスタヘッドを交代制にしなければ、特定センサ端末の残存電力は無くなり、ネットワークの接続性は失われる。通信可能なセンサ端末の減少は観測範囲の縮小、通信距離の長距離化によるネットワーク稼動時間の減少という問題に繋がる。

以降、2 章では関連研究から見た本研究の位置付けを述べ、続く 3 章ではクラスタリング技術について説明する。4 章ではクラスタヘッドの決定に用いるファジィ理論を紹介し、5 章において残存電力の不均一化を解決する手法を提案する。6 章ではシミュレーションにより提案手法の有効性を示す。7 章では、本稿をまとめ、今後の課題を述べる。

## 2 関連研究

現在、センサネットワークにおいて長期的な稼働を可能とするネットワークの構築手法は重要な研究課題となっている。文献<sup>2)</sup>ではモバイル無線PAN (Personal Area Networks) のためのクラスタヘッド決定システムにファジ理論を用いており、センサノードからクラスタの中心までの距離と残存バッテリー量という2つの入力パラメータを基に、クラスタ内に存在するそれぞれのセンサ端末がクラスタヘッドに選ばれる可能性を算出している。しかし、2つの入力パラメータだけでは、無線センサネットワークにおいて必ずしも最適なクラスタを形成することはできないため、我々はこれらの2つの入力パラメータに加えネットワークのトラフィックを考慮したクラスタヘッド決定システムの研究を行ってきた<sup>3)</sup>。

## 3 クラスタリング

ネットワークの長期的な稼働を実現するための省電力化は無線センサネットワークにおける重要な技術課題である。データ送信時の消費電力は、データ受信時に比べ大きく、距離の2乗に比例するため消費電力を抑えるためには距離の近いセンサ端末同士で通信する必要がある。この問題点を解決するために、近距離で通信を行いデータを収集するための手法がクラスタリングである。無線センサネットワークにおけるクラスタリングでは、まず近接するセンサ端末同士でクラスタを形成し、クラスタヘッドと呼ばれる代表センサ端末を決定する。クラスタ内に存在するクラスタヘッド以外のセンサ端末はクラスタメンバと呼ばれ、センシングした情報をクラスタヘッドへ送信する。その後、クラスタヘッドは集約したクラスタ内の情報を圧縮し、基地局へ送信する。しかし、クラスタヘッドとなったセンサ端末は他のセンサ端末と比べ、短時間で多くのエネルギーを消費するため、クラスタヘッドは適宜変更する必要がある。

この問題を解決するために様々なクラスタリング手法が存在し、LEACH<sup>1)</sup>、PEGASIS<sup>4)</sup>、PEDAP<sup>5)</sup>などはその代表的な例である。特にLEACHはネットワークの長期的な稼働を実現する手法として広く知られている。LEACHでは、センサネットワーク内の全センサノード数に対するクラスタヘッドの割合 $P$ とラウンド数 $r$ によって閾値を定め、クラスタヘッドを確率的に決定する。クラスタヘッドは1ラウンドごとに交代し、クラスタの再構成が行われる。1ラウンドとは、クラスタヘッドがクラスタ内の全て

のセンサノードから情報を収集し、基地局まで情報を送信する一連のプロセスのことを指す。過去 $1/P$ ラウンドにおいてクラスタヘッドとなっていないセンサ数を $G$ とすると、識別子が $i$ であるセンサ端末は、一様な乱数 $s(s \in [0, 1])$ を選択し、その上で閾値 $T(i)$ を計算する。閾値 $T(i)$ は式(1)のように定義される。

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

LEACHでは以上のようなアルゴリズムにより、全てのセンサノードが一定の確率で順にクラスタヘッドとなる。しかし、これは全てのセンサノードの残存バッテリー量が同一でならないことを意味している。もし、既存のネットワークに新たなセンサ端末を追加した場合、初期配置された残存バッテリー量の少ないセンサ端末と新たに追加された豊富なバッテリー量を持つセンサ端末がネットワークに混在し、これらが同様に一定の確率でクラスタヘッドに選ばれるため、初期配置されたセンサ端末は早急に稼働を停止することになる。LEACHは省電力化に優れたプロトコルであるが、以上のようなバッテリー量の異なるセンサ端末を考慮していない問題点がある。

## 4 ファジ理論

ファジという言葉は「曖昧」という意味であり、ファジ理論はその名の通り、境界がはっきりしない事象を扱う処理において有効な理論である。通常の数学的な集合はクリスプ集合と呼ばれ、ある要素がある集合に属していない場合を0、属している場合を1と定義し、各要素がある集合に属する度合いが0もしくは1と明確に定まる。一方、ファジ理論の特徴であるファジ集合では、各要素がある集合に属する度合いとして、0と1の中間的な値を許容する。これにより、とても大きい・やや大きい・やや小さい・とても小さいといった自然言語が有する曖昧な表現に対して中間的な値を対応させることができる。また、自然言語を利用できるので熟練者の知識や経験を制御システムに生かすこともできる。ファジ理論では、0と1の中間的な値をメンバーシップ値と呼び、各要素に対してメンバーシップ値を対応させる関数をメンバーシップ関数と呼ぶ。

ファジ理論の制御への応用は、ファジ制御として早くから着目され、成功を収めた分野であり、各種家電製品や地下鉄の自動運転などに実用化されている。ファジ理論を用いた制御の特徴として、それぞれのルール同士がお互いに重なり合った条件を

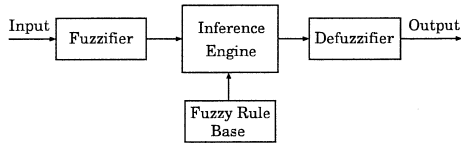


図1 ファジィ推論システム

表1 入出力パラメータのレベル

Parameters	Term Sets
Remaining Battery Power of Sensor (RPS)	Low, Middle, High
Degree of Number of Neighbor Nodes (D3N)	Few, Medium, Many
Distance from Cluster Centroid (DCC)	Light, Moderate, Heavy
Probability (Possibility) of CH Selection (PCHS)	Very Weak, Weak, Little Weak, Medium, Little Strong, Strong, Very Strong

カバーしているため、ルールを実行する回路の破損などによるルールの欠落時も、システムが急に止まることなく精度を落とした状態で動作を続けられるという頑健性の高さがあげられる<sup>6)</sup>。

## 5 提案手法

### 5.1 ファジィ推論システム

本節では、ファジィ理論を用いたクラスタヘッドの決定システムの構成について説明する。図1は提案手法におけるファジィ推論システムの構成図である。

入力された数値は Fuzzifier によってメンバーシップ関数を用いて言語表現に置き換えられ、推論を行うルールが定められた Fuzzy Rule Base (FRB) に従って Inference Engine によりファジィ推論を行い、言語表現による解を得る。推論によって得られた解は Defuzzifier によって再び数値化され出力される。FRB は IF  $x$  is A THEN  $y$  is B といった IF-THEN 形式で表され、 $x$  is A は前件部、 $y$  is B は後件部である。ファジィ推論システムではこれらのルールに基づき、推論を行った結果、解を得る。ルール数が多い場合は後件部から複数の解が求まるため、解の合成を行わなければならない。解を求めるための推論法は Min-Max 重心法(マムダニの推論法)<sup>7)</sup> が最も一般的である。Min-Max 重心法では、前件部の解、つまり後件部のメンバーシップ値を求める際には AND 演算を用い、推論結果は OR 演算により集合を合成し、最後に合成した集合の重心を求めることで得られる。また、メンバーシップ関数の横軸を  $y$ 、合成したファジィ集合を  $\mu(y)$  とすると、重心  $y_0$  は式(2)のように定義される。

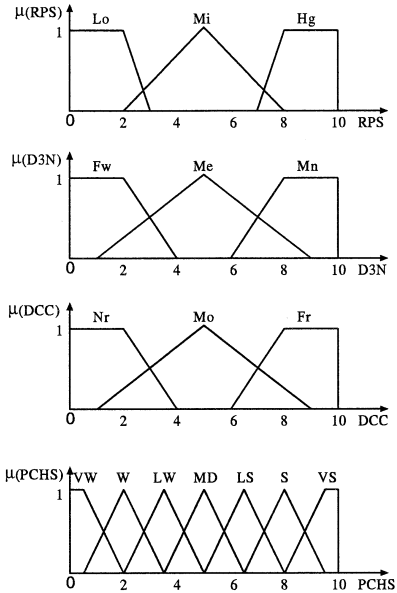


図2 提案手法におけるメンバーシップ関数

$$y_0 = \frac{\int y \cdot \mu(y) dy}{\int \mu(y) dy} \quad (2)$$

### 5.2 入出力パラメータ

本節ではクラスタヘッドを決定する際の基準となる入出力のパラメータについて説明する。従来手法では、残存バッテリー量、センサノードからクラスタの中心までの距離、ネットワークにおけるトラフィック量からクラスタヘッドを決定している。本稿では、従来手法で用いたトラフィック量に代わり、センサ端末における隣接ノード数を考慮したシステムの提案を行う。提案手法における各入力パラメータはそれぞれ3つ、出力パラメータは7つのレベルに分割されている。各入出力パラメータと分割レベルの関係を表1に示す。

表中の Remaining Battery Power of Sensor (RPS) は残存バッテリー量、Degree of Number of Neighbor Nodes (D3N) は隣接ノード数、Distance from Cluster Centroid (DCC) はセンサノードからクラスタの中心までの距離、Probability of CH Selection (PCHS) はノードがクラスタヘッドに選ばれる度合いをそれぞれ表している。以下、本稿では各パラメータのレベル名を省略し、次のように表記する。

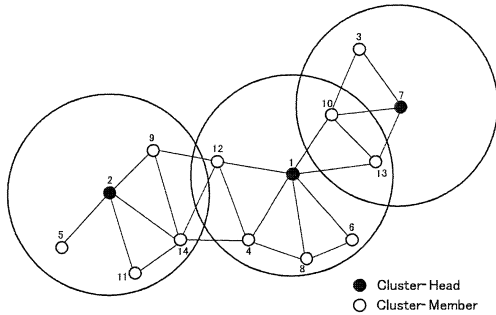


図3 隣接ノード数によるクラスタヘッドの決定

- RPS = {Low (Lo), Middle (Mi), High (Hg)}
- D3N = {Few (Fw), Medium (Me), Many (Mn)}
- DCC = {Near (Nr), Moderate (Mo), Far (Fr)}
- PCHS = {Very Weak (VW), Weak (W), Little Weak (LW), Medium (MD), Little Strong (LS), Strong (S), Very Strong (VS)}

これらの入出力パラメータおよび、レベルを考慮し作成したメンバーシップ関数を図2に示す。

隣接ノード数を考慮したクラスタヘッド決定の利点は、隣接ノード数の多いセンサ端末からクラスタヘッドとなるため、従来手法に比べより少ないクラスタヘッド数でより多くのノードをクラスタに含むことが可能となる点である。隣接ノード数のみを考慮したクラスタヘッドの選択手順の例を図3に示す。

図3は14のセンサ端末から成る小規模なネットワークである。なお、各ノードにはそれぞれのセンサ端末を識別するために個別のIDが割り振られているものとする。まず、最も多い隣接ノード数を持つ1番のノードをクラスタヘッドとする。1番のノードに隣接するセンサ端末はクラスタメンバとなるため、クラスタヘッドの候補から除外する。次に、残った候補の中から隣接ノード数の最も多い2番のノードをクラスタヘッドとする。2番のノードのクラスタメンバを除外すると残りのノードは3番と7番となる。クラスタヘッドの候補となったセンサ端末の隣接ノード数が同じ場合は2つのノードのIDを比較し、より大きいIDを持つセンサ端末をクラスタヘッドとする。3番と7番のセンサ端末の隣接ノード数は共に1となるため、最後に7番のセンサ端末をクラスタヘッドとし、クラスタの構成を終了する。

表2 入力パラメータと重み

Rule	RPS	D3N	DCC
1	Lo	Fw	Fr
2	Mi	Me	Mo
3	Hg	Mn	Nr

表3 出力パラメータと重み

VW	W	LW	MD	LS	S	VS
3	4	5	6	7	8	9

表4 提案手法におけるファジィルールベース

Rule	RPS	D3N	DCC	PCHS
1	Lo	Fw	Nr	VW
2	Lo	Fw	Mo	W
3	Lo	Fw	Fr	W
4	Lo	Me	Nr	W
5	Lo	Me	Mo	W
6	Lo	Me	Fr	W
7	Lo	Mn	Nr	VW
8	Lo	Mn	Mo	VW
9	Lo	Mn	Fr	VW
10	Mi	Fw	Nr	W
11	Mi	Fw	Mo	LW
12	Mi	Fw	Fr	MD
13	Mi	Me	Nr	LW
14	Mi	Me	Mo	MD
15	Mi	Me	Fr	LS
16	Mi	Mn	Nr	MD
17	Mi	Mn	Mo	LS
18	Mi	Mn	Fr	S
19	Hg	Fw	Nr	LW
20	Hg	Fw	Mo	MD
21	Hg	Fw	Fr	LS
22	Hg	Me	Nr	MD
23	Hg	Me	Mo	LS
24	Hg	Me	Fr	S
25	Hg	Mn	Nr	LS
26	Hg	Mn	Mo	S
27	Hg	Mn	Fr	VS

### 5.3 ファジィルールベース

我々は、第5.2節に示したそれぞれの入出力パラメータに重み付けを行い、ファジィ理論の特徴である主観を取り入れた修正を施すことでファジィルールベースを作成した。各入力パラメータと重みの関係を表2、出力パラメータと重みの関係を表3に示す。

ファジィルールベースにおけるルール数は入力パラメータの数と分割されたレベルの数に依存する。提案手法では3つの入力パラメータがそれぞれ3つのレベルに分割されているため、合計27のルールでファジィルールベース構成する必要がある。また、個々のルールは表2の3つの入力パラメータの重みの合計値と表3を比較し、出力パラメータのレベル



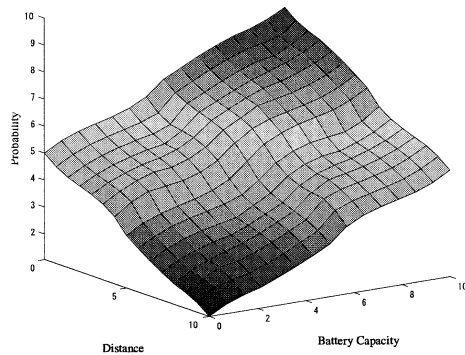


図4 従来手法におけるシミュレーション結果1

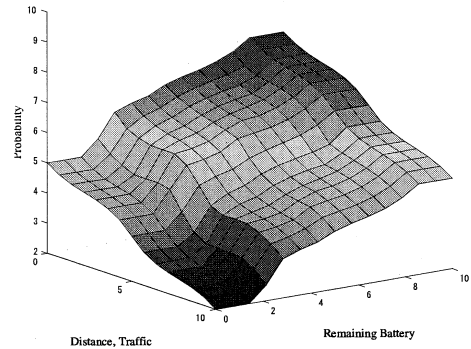


図5 従来手法におけるシミュレーション結果2

を決定することで作成する。例えば、最も条件の悪いパターンは入力パラメータが Lo,Fw,Fr となる場合であり、この時の重みの合計値は  $1+1+1$  で3となる。ゆえに、表3より、出力パラメータは VW となる。また、最も条件の良いパターンは入力パラメータが Hg,Mn,Nr となる場合であり、この時の重みの合計値は  $3+3+3$  で9となる。ゆえに、出力パラメータは VS となる。しかし、この決定法では残存バッテリー量が低いセンサ端末でも、隣接ノード数が多ければ他の多くの残存バッテリー量を有するセンサ端末よりクラスタヘッドとなる度合いが高くなるという問題点がある。そこで、我々は前述のファジィルールベースを基に、残存バッテリー量が低く、隣接ノード数が多いセンサ端末がクラスタヘッドに選ばれる度合いが低くなるようファジィルールベースを修正した。提案手法におけるファジィルールベースを表4に示す。

## 6 シミュレーション結果と考察

本節では従来手法、提案手法のシミュレーション結果を比較、検討することで提案手法の有効性を評価する。図4は文献<sup>2)</sup>におけるクラスタヘッド決定システム、図5は以前我々が提案を行ったシステム<sup>3)</sup>、図6,7,8は提案手法におけるシステムのシミュレーション結果である。

図4のシミュレーション結果では、センサノードからのクラスタの中心までの距離と残存バッテリー量に比例して、センサ端末がクラスタヘッドに選ばれる度合いが高くなっている。そのため、残存バッテリー量の低いセンサ端末でも、距離が近ければクラスタヘッドに選ばれる度合いが高くなってしまふ。残存

バッテリー量の少ないセンサ端末をクラスタヘッドに決定すると、早い段階でセンサ端末がネットワークから失われるため、長期的な稼働を実現する上では問題となる。図5のシミュレーション結果では、残存バッテリー量の少ないセンサ端末はクラスタヘッドに選ばれる可能性が低くなっているものの、クラスタの中心までの距離が近く、トラフィック量の少ないセンサ端末はクラスタヘッドに選ばれる可能性が高くなっている。図6は提案手法における残存バッテリー量とセンサノードからクラスタの中心までの距離を基にクラスタヘッドに選ばれる度合いを算出したシミュレーション結果であり、残存バッテリー量が少ない場合はセンサノードからクラスタの中心までの距離に関係なくクラスタヘッドに選ばれる度合いがほぼ一定となっている。図7は残存バッテリー量と隣接ノード数を基にクラスタヘッドに選ばれる度合いを算出したシミュレーション結果であり、残存バッテリー量が少なく隣接ノード数がおおよそ7以下の場合にはクラスタヘッドに選ばれる度合いがほぼ一定となり、隣接ノード数がおおよそ7以上の場合は隣接ノード数の増加に伴い、クラスタヘッドに選ばれる度合いが減少している。しかし、十分な残存バッテリー量を持つセンサ端末は隣接ノード数の増加に比例しクラスタヘッドに選ばれる度合いが増加するため、センサ端末の減少を防ぐと同時に効率的なクラスタ形成が可能となる。図8は隣接ノード数とセンサノードからクラスタの中心までの距離を基にクラスタヘッドに選ばれる度合いを算出したシミュレーション結果であり、それぞれのパラメータに比例しクラスタヘッドに選ばれる度合いが高くなっている。

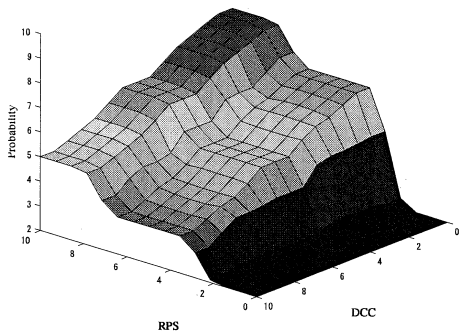


図 6 提案手法におけるシミュレーション結果 1

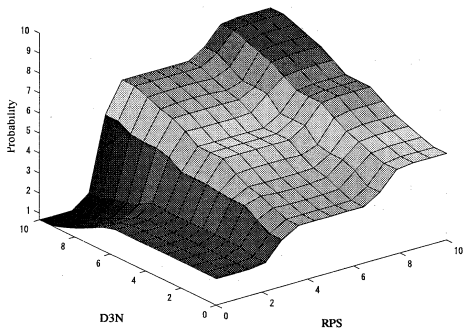


図 7 提案手法におけるシミュレーション結果 2

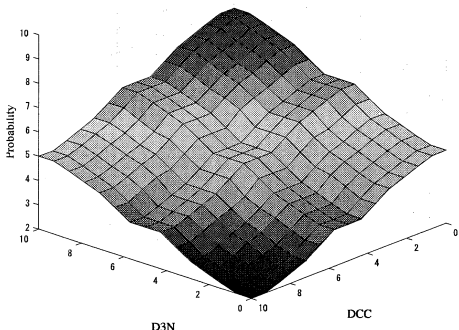


図 8 提案手法におけるシミュレーション結果 3

## 7 むすび

本稿では、クラスタヘッドの決定システムにフuzzy理論を用い、残存電力の不均一化を解消する手法を提案した。提案手法では、残存バッテリー量の少ないセンサ端末は、他のパラメータが好条件であっても従来手法に比べクラスタヘッドに選ばれにくくなり、残存電力の不均一化解消において有効である。残存電力の不均一化を解消することで従来手法より通信可能な端末が増え、ネットワークの長期的な稼働が期待できる。また、提案手法では隣接ノード数を考慮することにより、より少ないクラスタヘッド数で多くのセンサ端末をクラスタに含むことが可能となるため、より効率的なクラスタ形成を行うことが可能となる。今後は提案手法をネットワークシミュレータであるNS-2のクラスタリングプロトコル上に実装し、ネットワークの稼働時間や残存バッテリー量の不均一性を比較・検討することが課題となる。

## 参考文献

- 1) W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks," *Proc. of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*, pp. 3005–3014, 2000.
- 2) Q. Liang, "A design methodology for wireless personal area networks with power efficiency," *Proc. of the Wireless Communications and Networking (WCNC)*, vol. 3, pp. 1475–1480, 2003.
- 3) J. Anno, L. Barolli, F. Xhafa, and A. Durrresi, "A cluster head selection method for wireless sensor networks based on fuzzy logic," *Proc. of IEEE TENCON-2007*, pp. CD-ROM, 4 pages, 2007.
- 4) S. Lindsey, C. Raghavendra, and K. M. Sivalingam, "Data gathering algorithms in sensor networks using energy metrics," *IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems*, vol. 13, no. 9, pp. 924–935, 2002.
- 5) H. O. Tan and I. Korpeoglu, "Power efficient data gathering and aggregation in wireless sensor networks," *Proc. of the Association for Computing Machinery International Conference Management of Data (ACM SIGMOD)*, vol. 32, no. 4, pp. 66–71, 2003.
- 6) J. M. Mendel, "Fuzzy logic systems for engineering: A tutorial," *Proc. of the IEEE*, vol. 83, no. 3, pp. 345–377, 1995.
- 7) E. H. Mamdani, "Fuzzy logic systems for engineering: A tutorial," *International Journal of Man-Machine Studies*, vol. 8, pp. 669–678, 1976.