

センサネットワークにおけるファジィ理論を用いた クラスタヘッドを決定するためのシステム

阿武 純平[†], 田中 亮達[†], バロリ レオナルド[†]

[†] 福岡工業大学情報工学部情報通信工学科

E-mail: { s03b2003, s03b2028 }@ws.ipc.fit.ac.jp, barolli@fit.ac.jp

概要 センサ端末の小型化、低コスト化によりセンサネットワークの応用範囲が広がっている。しかし、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不可欠となる。従来手法である LEACH では、ネットワーク内のセンサ端末が同一であることを前提としており、バッテリー量の異なるセンサ端末が存在することは想定されていない。そこで、本稿ではファジィ理論を用いることで、バッテリー量の異なるセンサ端末を考慮したクラスタヘッドの決定システムを提案する。また、シミュレーションを行った結果、提案手法では従来手法より残存電力の不均一化の解消において有効であり、ネットワークの長期的な稼働が期待できることがわかった。

A Fuzzy-based Cluster Head Decision System for Sensor Networks

Junpei Anno[†], Ryoutatu Tanaka[†], Leonard Barolli[†]

[†] Department of Information and Communication Engineering
Fukuoka Institute of Technology

E-mail : { s03b2003, s03b2028 }@ws.ipc.fit.ac.jp, barolli@fit.ac.jp

Abstract Presently, sensor networks supported by recent technological advances in low power wireless communications along with silicon integration of various functionalities are emerging as a critically important computer class that enable novel and low cost applications. The sensor nodes are equipped with battery power. The node life depends on node battery power and the network lifetime depends on node lifetime. The extending of network lifetime is a very important problem of sensor networks. In LEACH, the network nodes are considered to have the same battery power. However, this is not the case in real environments. In this paper, in order to deal with this problem we propose a power reduction algorithm based on fuzzy logic for sensor networks. We evaluate the proposed algorithm by simulations and show that proposed algorithm has 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、その友好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るうえ、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省電力化は重要な研究課題となっている[1]。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[2]、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働時間の減少という問題に繋がる。

以降、2 章で関連研究から見た本研究の位置付けを述べ、続く 3 章で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、残存電力の不均一を解決する手法を提案したのち、6 章でシミュレーションにより提案手法の有効性を示す。最後に 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省電力化、すなわち長期的な稼働が可能なネットワークの構築は重要な研究課題となっている。論文[3]ではモバイル無線 PAN (Personal Area Networks) のための省電力化を考慮したトポロジーの提案を行っており、クラスタヘッドの決定においてファジィ理論を用いている。クラスタヘッドの決定システムは、センサノードとクラスタヘッド間の距離と残存バッテリー容量という 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。ファジィ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。本研究ではファジィ理論を用いることで、バッテリー量の異なるセンサ端末を考慮したクラスタヘッドの決定システムを提案する。

3. クラスタリング

クラスタリングの既存技術には LEACH[2]、PEGASIS[4]、PEDAP[5]など様々なものが存在するが、センサネットワークの分野においては省電力化に有効な LEACH が広く知られている。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 とするとき、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均一でならないことを意味している。センサネットワーク内に、はじめから残存バッテリー量の異なるセンサ端末が存在した場合、残存バッテリー量の少ないセンサ端末も他のセンサ端末と同様に一定の確率でクラスタヘッドに選ばれるため、大量のエネルギーを消費し、稼働を停止することになる。

4. ファジィ理論

ファジィという言葉は「あいまい」という意味であり、ファジィ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[6]。

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、ファジィ理論の特徴であるファジィ集合では、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。ファジィ理論では、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。

ファジィ理論の制御への応用は、ファジィ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[7]。図1はファジィ理論におけるファジィ推論システムの構成図である[8]。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(ファジィ化)、推論を行うルールが定められたFuzzy Rule Base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(非ファジィ化)出力される。

ファジィルールベースはIF x is A THEN y is BといったIF-THEN形式で表され、x is Aを前件部、y is B後件部という。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にはMin-Max重心法(マムダニの推論法)[9]、関数型推論法、簡略型推論法など様々な手法があるが、本稿では最も一般的な推論方法であるMin-Max重心法を用いた。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、推論結果を求める際にはOR演算を用いる。AND演算とは、データを比較した場合に小さい方の値を取ることであり、OR演算は大きい方の値を取ることである。

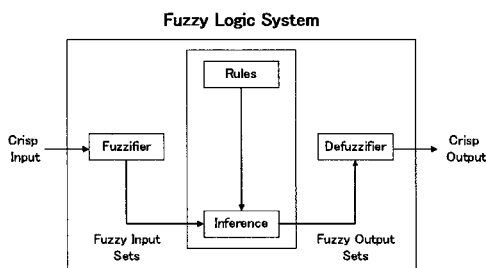


図1 ファジィ推論システム

5. 提案手法

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を提案する。提案手法では以下の3つの要素を入力パラメータとして用いた。各パラメータはそれぞれ3つのレベルに分割されている。

- Distance {Near, Moderate, Far}
- Sensor Power {Low, Moderate, High}
- Traffic {Light, Moderate, Heavy}

Distanceはセンサノードとクラスタヘッド間の距離、Sensor Powerは残存バッテリー量、Trafficは通信におけるセンサノードのトラフィック量を表している。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、センサ端末間の距離は消費電力に大きな影響を与える。また、残存バッテリー量の消滅はネットワーク構成要素の消滅であり、長期的なネットワークの稼働を実現させるうえで重要なパラメータとなる。また、センサネットワークでは、大部分のノードが長期間パケットの送受信を行わない、スリープ状態になり、クエリ配信やイベント検地などにより、一時的にパケットの送受信を行うといったトラフィック量の変動が想定されるため、本稿では、トラフィック量をクラスタヘッドの決定における重要な要素として新たに採用した。

出力パラメータは以下の要素である。パラメータは7つのレベルに分割されている。

- Probability {Very Weak, Weak, Little Weak, Medium, Little Strong, Strong, Very Strong}

Probabilityはクラスタ内のセンサノードがクラスタヘッドに選ばれる確率を表している。

表1に提案手法における入出力パラメータとレベルを示す。また、図2に距離とトラフィック量、図3に残存バッテリー量、図4にクラスタヘッド選定率のメンバーシップ関数を示す。

表1 提案手法におけるパラメータとレベル

Parameter	Level
Distance	Near, Moderate, Far
Sensor Power	Low, Moderate, High
Traffic	Light, Moderate, Heavy
Probability	Very Weak, Weak, Little Weak Midium Little Strong, Strong, Very Strong

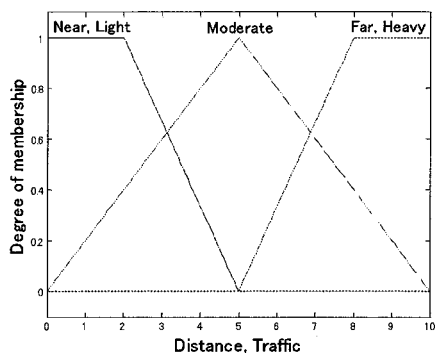


図2 距離とトラフィック量のメンバーシップ関数

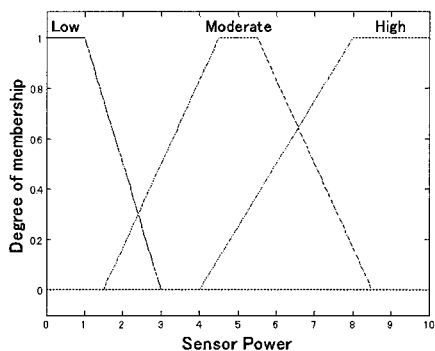


図3 残存バッテリー量のメンバーシップ関数

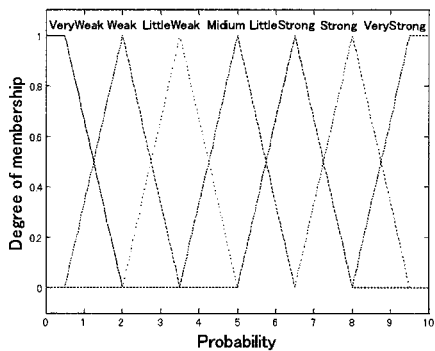


図4 クラスタヘッド選定率のメンバーシップ関数

距離とトラフィック量のメンバーシップ関数は同形とし、残存バッテリー量のメンバーシップ関数は、全センサノードの稼働率向上を考慮し設定した。また、クラスタヘッド選定率のメンバーシップ関数は、それぞれのレベルがほぼ均等になるように設定した。ファジィルールベースは、センサノードとクラスタヘッド間の距離が近く、十分な残存バッテリー量を持ち、トラフィック量が少ないという条件に基づいて作成し、表2に示す。

表2 ファジィルールベース

Rule	Distance	Sensor Power	Traffic	Probability
1	Near	Low	Light	Little strong
2	Near	Low	Moderate	Medium
3	Near	Low	Heavy	Little weak
4	Near	Moderate	Light	Strong
5	Near	Moderate	Moderate	Little strong
6	Near	Moderate	Heavy	Medium
7	Near	High	Light	Very strong
8	Near	High	Moderate	Strong
9	Near	High	Heavy	Little strong
10	Moderate	Low	Light	Medium
11	Moderate	Low	Moderate	Little weak
12	Moderate	Low	Heavy	Weak
13	Moderate	Moderate	Light	Little strong
14	Moderate	Moderate	Moderate	Medium
15	Moderate	Moderate	Heavy	Little weak
16	Moderate	High	Light	Strong
17	Moderate	High	Moderate	Little strong
18	Moderate	High	Heavy	Medium
19	Far	Low	Light	Little weak
20	Far	Low	Moderate	Weak
21	Far	Low	Heavy	Very weak
22	Far	Moderate	Light	Medium
23	Far	Moderate	Moderate	Little weak
24	Far	Moderate	Heavy	Weak
25	Far	High	Light	Little strong
26	Far	High	Moderate	Medium
27	Far	High	Heavy	Little weak

次に、ファジィ推論によりクラスタヘッドを決定する過程を説明する。Distance を 2、Sensor Power を 4、Traffic を 5 と設定した場合の推論結果は図5となる。解の合成には Min-Max 重心法を用いた。

Min-Max 重心法による推論では、前件部のいずれかに 0 が含まれる場合、AND 演算により最も小さい値がとられるため、後件部も 0 となり、推論結果は空集合となる。よって、ルール 1 から 4、6 から 13、15 から 27 は解の合成の対象外となる。AND 演算によって得られた 2 つのファジィ集合は OR 演算により合成され、重心法により推論結果として出力される。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。

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

式(2)により重心 y_0 は 5.9311 と求まり、このセンサノードがクラスタヘッドに選ばれる度合は 5.9311 となる。

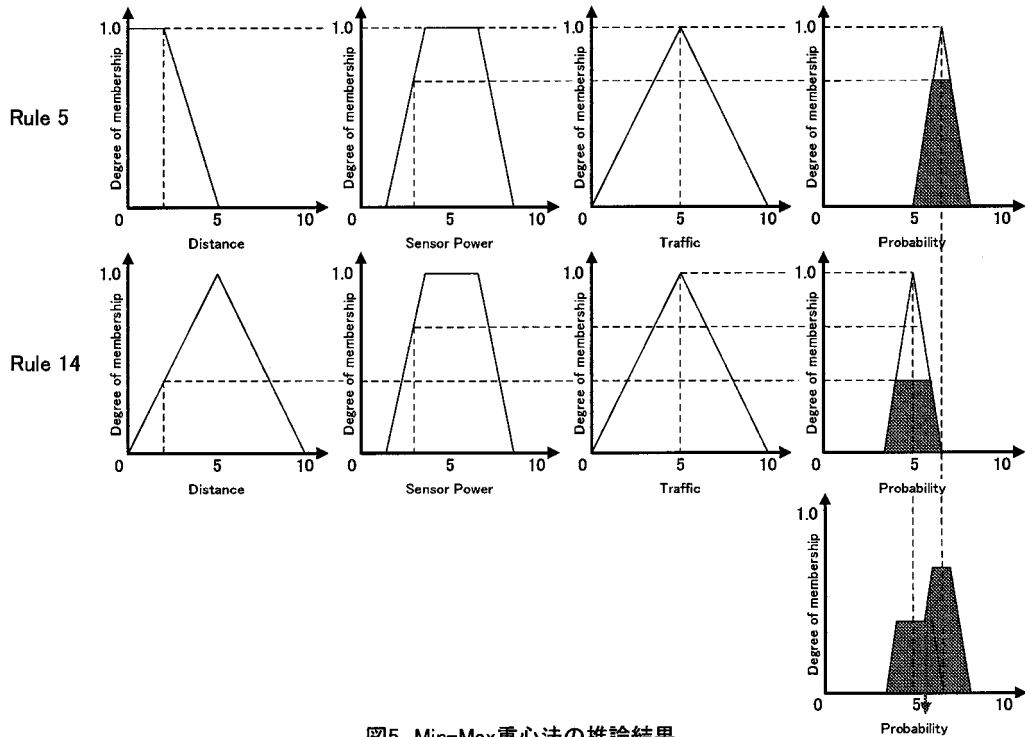


図5 Min-Max重心法の推論結果

6. シミュレーション結果

提案手法の有効性をシミュレーションにより評価する。シミュレーションにおけるメンバーシップ関数とファジールールベースは前節に示したものと同様である。シミュレーションでは3つの入力パラメータの値がそれぞれ0から10までの場合において、センサノードがクラスタヘッドに選ばれる確率がどのように変化するかを検討した。提案手法は3入力1出力のシステムであるが、3次元を超える次元の場合、結論を表示するのが困難となるため、仮想的に2入力1出力とし、3次元による結果の表示を行った。入力パラメータとして表示されていない値は5で固定値とする。また、提案手法の比較対象として図6に関連研究におけるクラスタヘッド決定システムの出力結果を示す。また、図7に距離およびトラフィック量と残存バッテリーによる出力結果を示し、図8に距離とトラフィック量による出力結果を示す。

シミュレーション結果より、提案手法と関連研究の手法をセンサノード間の距離・残存バッテリー量といった同一パラメータで比較した場合、提案手法では同一条件のセンサノードがクラスタヘッドに選ばれる確率が低くなっていることがわかる。また、関連研究の手法では残存バッテリー量の低いセンサノードも一定の確率でクラスタヘッドが選ばれているのに比べ、図7の出力結果では、残存バッテリー量の値が2から10の間では目立った変化は見られないが、値がおおよそ2以下になると、センサノードがクラスタヘッドに選ばれる確率が急激に下がっていることがわかる。さらに、提案手法ではセンサノード間の距離、トラフィック量に関係なく残存バッテリー量の特によく少ないセンサノードはクラスタヘッドに選ばれる確率が低くなる。以上の3点から提案手法は、クラスタリングによる残存電力の不均一化解消において効果的であると言える。

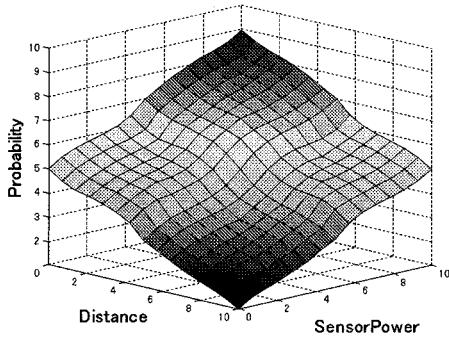


図6 関連研究におけるシミュレーション結果

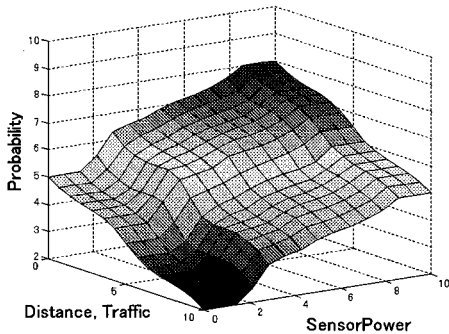


図7 距離およびトラフィック量と残存バッテリー量による出力結果

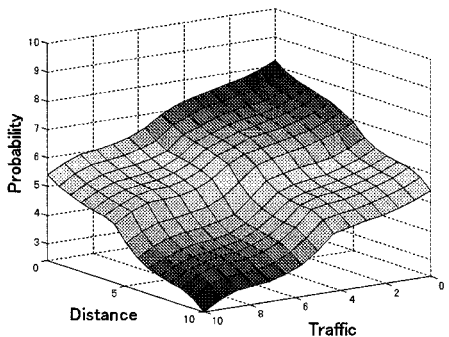


図8 距離とトラフィック量による出力結果

7. まとめ

本稿では、クラスタヘッドの決定にファジイ理論を用い、残存電力の不均一化を解決する手法を提案し、シミュレーションによる評価を行った。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センサ端末が増え、ネットワークの長期的な稼動が期待できる。今後は、センサノ

ードのSN比・センサノード間に発生するセンシング干渉・センサノード間のマルチホップ通信におけるリンク数などを入力パラメータとして考慮し、メンバーシップ関数・ルールベースの最適化を行う。その後、現在利用されている主なクラスタリング手法にシステムを実装し、ネットワークの稼動時間や残存エネルギーの不均一性を比較・検討する。また、一般的なMin-Max重心法などの推論法では、入力パラメータが多くなるほど無視できない誤差が発生し、出力が非線形となる問題があるため、Min-Max重心法に変わる新たな推論法の導入などが今後の課題となる。

参考文献

- [1] 安藤 繁, 田村 洋介, 戸辺 義人, 南 正輝, “センサネットワーク技術 ユビキタス情報環境の構築に向けて”, 東京電機大学出版局, pp.21, 79-82, 2005.
- [2] 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-2000), pp.3005-3014, 2000.
- [3] Q. Liang, “A Design Methodology for Wireless Personal Area Networks with Power Efficiency”, IEEE WCNC, pp.1475-1480, 2003.
- [4] S. Lindsey, C. Raghavendra, 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, I. Korpeoglu, “Power Efficient Data Gathering and Aggregation in Wireless Sensor Networks”, Proc. ACM Int. Conf. Management of Data (ACM SIGMOD), Vol.32, No.4, pp.66-71, 2003.
- [6] 萩原 将文, “ニューロ・ファジィ・遺伝的アルゴリズム”, 産業図書, pp.75-92,129-142, 2000.
- [7] 菅野 道夫, “ファジィ制御”, 日刊工業新聞社, 1993.
- [8] J. M. Mendel, “Fuzzy Logic Systems for Engineering: A Tutorial”, Proc. of the IEEE, Vol.83, No.3, pp.345-377, 1995.
- [9] E.H. Mamdani, “Advances in the Linguistic Synthesis of Fuzzy Controller”, Int. Journal of Man-Machine Studies, pp.669-679, 1976.