

# 無線センサネットワークにおける効果的な フォーディング出力調整のための タブー人工蜂コロニーアルゴリズム

李 豪隆<sup>1</sup> 中野 秀洋<sup>1</sup> 宮内 新<sup>1</sup>

**概要:** 無線センサネットワーク (WSN) では、各センサノードの制御のためにシンクノードからクエリの散布を行う必要がある。WSN の総電力消費を抑えるためには、クエリに対するフォーディングを行うノードの数と送信電力値を最小化する必要がある。また、各センサノードの負荷を分散させるためには、複数の送信電力値パターンを得る必要がある。この問題に対して、本稿ではタブー人工蜂コロニー最適化に基づく手法を提案する。従来手法と比較して、提案手法は大規模な WSN に対しても適用可能である。数値実験を行い、提案手法の有効性を示す。

## 1. はじめに

自然環境モニタリング、居住空間や工場における環境制御などの様々な用途に利用される技術として、無線センサネットワークが多く研究者、開発者の関心を集めている [1]。無線センサネットワークでは数百、数千もの小さなセンサノードが大規模観測領域内に配置され、各センサノードのセンサ情報はセンサノード間のマルチホップ通信によってシンクノードに集められる。各センサノードは観測点や対象物体の状態 (温度、湿度、動きなど) を測定するセンシング機能、限られた情報処理機能、及び簡素な無線送受信機能で構成され、一般にバッテリー等の電源容量に制約のあるリソース上で動作している。よって、無線センサネットワークの長期運用を実現するためには各センサノードの消費電力を抑え、効率的にセンサ情報を収集する必要がある。

無線センサネットワークにおいて、センシング情報送信要求等の制御メッセージの配信などでフラッディングが多用される。しかし、一般的なフラッディングの場合、全センサノードが受信情報を最大送信電力によって近隣のセンサノードに転送する。特に、無線センサネットワークでは数百、数千ものセンサノードを観測領域内に散布して状態観測を行うため、高密度な無線センサネットワーク環境の場合にフラッディングの負荷は極めて大きくなり、無線センサネットワークの運用期間が短くなることが問題となる。しかし、多くの場合、全てのセンサノードが常に受信情報

を転送しなくてもネットワークを構成する全センサノードに情報を普及させることができる。

この問題を解決する手法として、受信情報を転送するフラッディングノード (Forwarding Node ; FN) を最適化アルゴリズムを用いて適切に選定する手法が提案されている [2]-[3]。この手法を用いれば必要最小限の複数の FN を選定することで全センサノードが受信情報を転送する必要がないため、無線センサネットワークの長期運用に対して有効である。しかし、この手法では各 FN は最大送信電力で受信情報を転送することが前提となっている。多くの場合で各 FN は最大送信電力で受信情報を転送する必要はない。各 FN の消費電力は送信電力の大きさに応じて大きくなるため、無線センサネットワークのさらなる長期運用のためには、より効率的なフラッディングが必要となる。

効率的なフラッディングの実現のため、FN の送信電力を調整する手法が提案されている。調整のためのアルゴリズムとして従来手法では競合型粒子群最適化法 (Competitive Particle Swarm Optimization ; CPSO) [4] や複数許容解探索型粒子群最適化法 (PSO plural acceptable solutions ; PSO-PAS) [5] などが用いられている。また、これらの手法では複数の FN の送信パターンを許容解として得ることで個々のセンサノードの負荷を分散できることが示されている [6]-[7]。しかし、センサノード数が多い場合、問題空間が高次元になるため、CPSO や PSO-PAS による手法は解空間の深い探索が困難になる。一方、近年に提案された人工蜂コロニーアルゴリズム (Artificial Bee Colony ; ABC) [8]-[10] は高次元問題に対する有効性が示されてい

<sup>1</sup> 東京都市大学

る。ABC を利用することで、センサノードが多い場合でも解空間の深い探索を行うことができる。しかし、基本的な ABC は複数の異なる許容解を発見することはできない。

本研究では、複数の異なる許容解を発見できるタブー人工蜂コロニーアルゴリズム (Tabu Artificial Bee Colony ; TABC) を用いて、無線センサネットワークにおける FN の送信電力調整手法に適用する。シミュレーションを行い、従来手法と比較することで提案手法の有効性を検証する。

## 2. Forwarding Node (FN) の選定

無線センサネットワークでは、観測領域にセンサノードとシンクノードが配置される。各センサノードは特定の無線通信範囲を持っており、無線通信範囲内に存在するセンサノード間でマルチホップ無線通信を行いシンクノードにセンシング情報を転送する。無線センサネットワークにおいて、センシング情報送信要求等の制御メッセージの配信などでフラッディングが多用される。しかし、一般的なフラッディングの場合では、全センサノードが受信情報を最大送信電力によって近隣のセンサノードに転送するため、センサノードの負荷が大きくなり、結果として無線センサネットワークの運用期間が短くなる。そこで、全センサノードからフォワーディングノード (Forwarding Node ; FN) を選定することで無線センサネットワークの長期運用を実現する手法が提案されている。この手法では全てのセンサノードが受信情報を転送するのではなく、選定された FN のみが転送する。一方で、FN でないセンサノードは情報の受信のみを行い、近隣のセンサノードへの転送は行わない。さらに、複数の FN の選定パターンを得ておき、それらを定期的に切り替えることで、各センサノードの転送負荷を分散させることが可能となる。しかし、この手法は各 FN が最大の送信電力で情報を転送することが前提となっている。送信電力が大きいと、FN に選定されたセンサノードの負荷は大きくなる。しかし、多くの場合で FN は最大の送信電力で受信情報を転送する必要はない。本稿では、FN を選定し、送信電力の調整を行う効率的なフラッディング手法に注目する。そして、大規模な無線センサネットワークに対しても、複数の良好な FN の送信パターンを得られるアルゴリズムを提案する。

本研究では、全地球測位システム (GPS) を持つセンサノードから構成される一般的な無線センサネットワークを想定する。初期段階において、シンクノードは位置発見メッセージ (LDM) を配信することによって全てのセンサノードから位置情報を収集する。この LDM を受信した各センサノードはシンクノードへ位置返答メッセージ (LRM) を送信する。シンクノードは収集した LRM から各センサノードの位置情報を把握することができる。

## 3. Artificial Bee Colony (ABC)

### 3.1 従来 ABC

人工蜂コロニー (Artificial Bee Colony ; ABC) [8]-[10] はミツバチなどの群れの行動を模倣するメタヒューリスティックアルゴリズムの一種である。ABC では、人工ハチが食料源 (解) の周辺を探索する。ABC アルゴリズムは以下の 3 つのフェーズで構成される。

#### (1) Employed Bees Phase

各 employed bee はある一つの食料源と関係づけられ、次式によって食料源の更新を試みる。

$$v_{id}^k = x_{id}^k + \phi \cdot (x_{id}^k - x_{md}^k) \quad (1)$$

ここで  $v$  は更新候補点、 $x$  は食料源位置、 $i$  ( $i = 1 \sim N$ ) と  $m$  ( $m = 1 \sim N, m \neq i$ ) は解候補番号、 $k$  はイタレーション数、 $\phi$  は  $[-1 : 1]$  の一様乱数、 $d$  ( $d = 1 \sim D$ ) は一様乱数によって選択されたある一つの設計変数番号である。ここで、更新候補点が食料源の位置よりも優れていれば食料源の位置を更新候補点に置き換え、そうでなければ置き換えは行わない。また、カウンター  $s$  を以下のように更新する。

$$s_i = \begin{cases} s_i + 1 & \text{if } f(v_i^k) \geq f(x_i^k) \\ 0 & \text{if } f(v_i^k) < f(x_i^k) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 $f(\cdot)$  は最小化すべき目的関数である。このフェーズでは全ての食料源に対して上記の操作を行う。

#### (2) Onlooker Bees Phase

各食料源  $x_i^k$  の適合度  $fit_i^k$  を以下の式によって計算する。

$$fit_i^k = \begin{cases} \frac{1}{1+f(x_i^k)} & \text{if } f(x_i^k) \geq 0 \\ 1 + abs(f(x_i^k)) & \text{if } f(x_i^k) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

次に、各食料源の相対価値確率  $P_i^k$  を以下のように算出する。

$$P_i^k = \frac{fit_i^k}{\sum_{n=1}^N fit_n^k} \quad (4)$$

onlooker bees は相対価値確率  $P_i^k$  に基づいたルーレット選択によって選択された食料源の探索を式 (1) によって行う。このフェーズでは上記のように優良解を優先的に探索する。

#### (3) Scout Phase

上記の 2 つのフェーズで、カウンター  $s_i$  がリミット値  $lv$  以上になった場合、十分に探索されたものとして、食料源

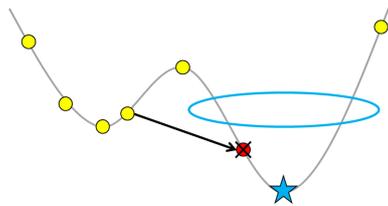


図 1 タブー範囲

Fig. 1 The Tabu range

$x_i$  を探索空間内にランダムに再配置し、カウンター  $s_i$  を 0 に再設定する。

### 3.2 提案手法 : Tabu ABC

本稿では、効率的に複数の異なる許容解を発見できるタブー人工蜂コロニー (Tabu Artificial Bee Colony ; TABC) を提案する。通常の ABC ではカウンター  $s$  がリミット値  $lv$  を超えた食料源は探索空間内にランダムに再配置される。そこで、TABC ではカウンター  $s$  がリミット値  $lv$  を超え、かつ目的関数値の上位に属している食料源の位置を保存する。これによって、探索を行っていく中で複数の優良解を得ることができる。一方、目的関数値の上位に属さない食料源は通常の Scout Phase と同様に探索空間内に再配置する。しかし、この方法のみでは同一の解を発見する可能性があるとともに局所最適解を必ず発見できる保証がない。そこで、図 1 のように保存された食糧源の位置からタブー範囲を作成する。その後、タブーの範囲内で粒子群最適化 (Particle Swarm Optimization ; PSO) [11] を適用し、一定期間の局所解探索を行う。そして、タブー範囲内 PSO 探索によって最終的に求めた解を保存する。このとき、タブー範囲の中心はタブー範囲内 PSO 探索によって得られた位置に変更する。なお、タブー範囲内に他の食糧源が存在する場合はそれをランダムに探索空間内に再配置する。また、タブー範囲内に食糧源の更新候補点が入った場合は現在の食料源の位置よりも優れていたとしても更新しない。これらによって、TABC は必要な数の複数の異なる解を得ることができる。

### 4. 送信電力調整問題への適用

TABC と CPSO をそれぞれ用いて、無線センサネットワークを構築する各センサノードの送信電力調整値パターンを求める。本研究では、各センサノードの送信電力値を設計変数とする：

$$x = (E_T(d_1), E_T(d_2), \dots, E_T(d_{n_{total}}))^T \quad (5)$$

ここで  $E_T(d_i)$  はセンサノード  $i$  の送信電力、 $d_i$  は各センサノードの送信範囲、 $n_{total}$  は無線センサネットワークを構成する全てのセンサノード数を表す。各センサノードの

表 1 無線センサネットワーク環境

Table 1 Conditions in WSNs

Parameter	value
Area size	500(m) × 500(m)
Number of sensor nodes	400
Radio range	150(m)
Total number of iterations	30000
Weight parameter $S$	1.5
Tabu and priority search range $r$	400

送信電力の算出は文献 [12] の電力消費モデルを使用する。無線センサネットワークを構成する全センサノードへの情報の普及を確実なものとし、なおかつ各センサノードの送信電力を最小限に抑制するために、目的関数を以下のように設計する。

$$f(x) = \frac{S^{-(n_{total} - n_{receive})}}{\sum_{i=1}^n E_T(d_i)} \quad (6)$$

ここで  $n_{receive}$  はシンクノードから配信された制御メッセージを受け取ったセンサノード数を表す。

## 5. 実験

### 5.1 実験環境

提案手法の有効性を確認するために ABC, TABC, CPSO の 3 つの手法を送信電力調整 FN 選定フラッディング手法に適用し、性能比較を行う。実験では 10 回の試行を行い目的関数 (6) の値を求め、その平均値によって評価する。表 1 に無線センサネットワーク環境のパラメータを示し、表 2 に提案手法のパラメータを示す。なお、ABC のパラメータは表 2 に示される値を使用した。また、CPSO におけるグループ数を 3、各グループの粒子数を 100 とし ( $p = 300$ )、他のパラメータは表 2 に示される値を使用した。ここで、求める FN のパターン数は 3 つとした。センサノードはランダムに観測領域内に配置する。無線センサネットワークのシミュレーションモデルを図 2 に示す。なお、この図には各 FN の送信範囲を 150m に固定した場合の最適解を示し、円は無線通信範囲を表す。この場合における全センサノードの総エネルギー消費量は 6.864mJ である。

### 5.2 実験結果

提案手法を用いることによって得られたフォーワーディングパターンを図 3 に示す。TABC によって 3 つの解が求められたときの平均イタレーション数は 34035.8 であった。ただし、これに加えて 1000 × 3 イタレーションのタブー範囲内 PSO 探索を行っている。表 3 に全センサノードの

表 2 提案手法パラメータ

Table 2 Parameters in proposed method

Method	Parameter	value	
提案手法	ABC	Colony size $cs$	300
		Employed bees $eb$	$cs \times 50\%$
		Onlooker bees $ob$	$cs \times 50\%$
		Limit value $lv$	4000
	Solution storage size		$cs \times 5\%$
	Iterations of PSO search $ips$		1000
PSO	Inertia coefficient $w$	0.8	
	Weight coefficient $c_1$	2.0	
	Weight coefficient $c_2$	0.8	
	Swarm's size $p$	200	

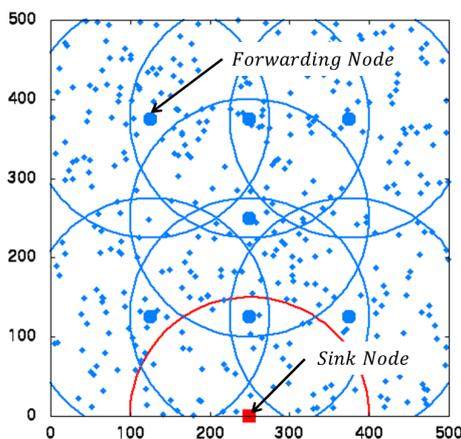


図 2 シミュレーションモデル  
 Fig. 2 A simulation model

総エネルギー消費量を示す。TABC と ABC は図 2 に示されるフォワーディングパターンの総エネルギー消費量よりも優れている。TABC では異なる複数の解を見つけることが可能であるが、通常の ABC はそれができない。そのため、ABC によって無線センサネットワークの長期運用に必要な複数のフラッディングパターンを得ることは困難である。TABC と CPSO を比較すると、TABC におけるそれぞれの許容解は CPSO よりも優れていることがわかる。また、タブー範囲内 PSO 探索を行う前であっても CPSO よりも優れている。これは TABC が CPSO よりも解空間の深い探索を行えることを示している。TABC は ABC の基本的な探索アルゴリズムを変更していないため、高次元問題に強い ABC の性能を劣化させることなく異なる複数の許容解を探索することができる。また、Scout Phaseにおいて保存された位置が局所最適解である保証は無いが、タブー範囲内 PSO 探索で局所最適解を探索することで解の質を向上させることができる。表 3 を見ると、TABC はタブー範囲内 PSO 探索により解の質が向上していることがわかる。図 4 に各手法における各センサノードの平均送信

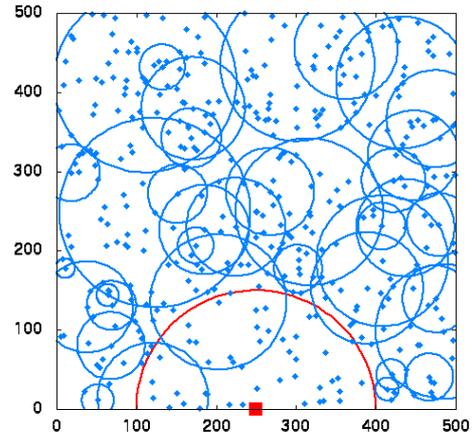
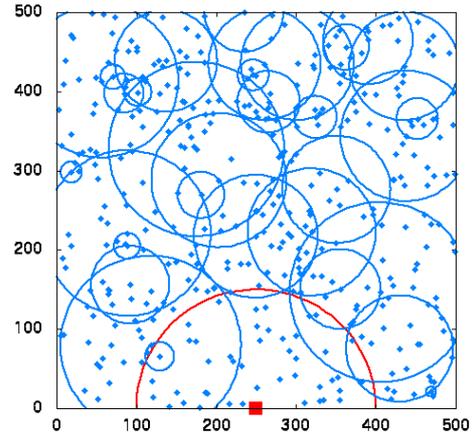
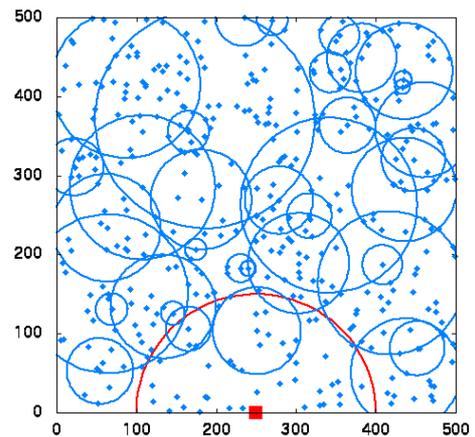


図 3 TABC のフォワーディングパターン  
 Fig. 3 Forwarding patterns for TABC

電力値を示す。この図より、TABC が CPSO、ABC よりも全センサノードの負荷を分散できることがわかる。したがって、提案手法は従来手法よりも無線センサネットワークの長期運用に対して有効であるといえる。

## 6. 結論

本稿では、無線センサネットワークの長期運用を行うために送信電力調整手法について議論した。送信電力調整手法における効果的な複数許容解の探索のために、TABC を用いた手法を提案した。無線センサネットワークの長期運

表 3 各手法のエネルギー消費量 ( $r = 400$ )

Table 3 Total energy consumption in each method ( $r=400$ )

Method		Total energy consumption		
		Best	Ave.	Worst
TABC with PSO local search	Solution1	6.186mJ	6.293mJ	6.385mJ
	Solution2	6.264mJ	6.353mJ	6.410mJ
	Solution3	6.371mJ	6.403mJ	6.461mJ
TABC without PSO local search	Solution1	6.217mJ	6.338mJ	6.449mJ
	Solution2	6.297mJ	6.401mJ	6.458mJ
	Solution3	6.396mJ	6.455mJ	6.513mJ
CPSO	Solution1	6.200mJ	6.456mJ	6.681mJ
	Solution2	6.344mJ	6.616mJ	6.796mJ
	Solution3	6.372mJ	6.797mJ	7.129mJ
ABC	Solution1	6.288mJ	6.336mJ	6.363mJ

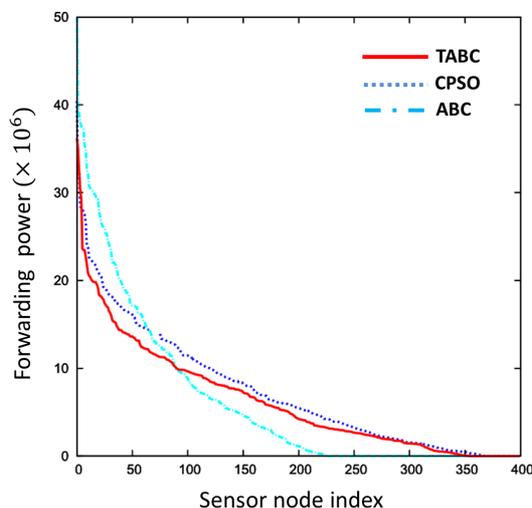


図 4 各センサノードの平均送信電力量

Fig. 4 Average forwarding power of each sensor node

用のためには複数の FN パターンを求めることが重要である。シミュレーション結果より、提案手法は従来手法よりも無線センサネットワークの長期運用を行う上で有効的な手法であることを示した。

#### 参考文献

[1] I. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam & E. Cayirci, "Wireless sensor networks: A survey," Computer Networks Journal, 38, 4, 393-422, 2002.

[2] J. Nagashima, A. Utani & H. Yamamoto, "Efficient flooding method using discrete particle swarm optimization for long-term operation of sensor networks," Proc. ICIC E-L, 3, 3(B), 833-840, 2009.

[3] T. Sasaki, H. Nakano, A. Utani, A. Miyauchi & H. Yamamoto, "Detecting Multiple Forwarding Node Sets for Query Dissemination in Wireless Sensor Networks Using Chaotic Neural Networks," Proc. URAI, 503-506, 2010.

[4] Y. Taguchi, Y. Kanamori, H. Nakano, A. Utani,

A. Miyauchi & H. Yamamoto, "A competitive PSO based on evaluation with priority for finding plural solutions," Proc. CEC, 102-107, 2010.

[5] A. Kumamoto, A. Utani & H. Yamamoto, "Advanced particle swarm optimization for computing plural acceptable solutions," Int. J. Innovation Computing, Information and Control, 5, 11(B), 4383-4392, 2009.

[6] Y. Kanamori, H. Nakano, A. Utani, A. Miyauchi, and H. Yamamoto, "An Efficient Flooding Scheme in Wireless Sensor Networks Using Competitive PSO," Proc. NOLTA, pp. 503-506, 2011

[7] J. Nagashima & A. Utani, "Forwarding Power Adjustment of Each Node for Adaptive and Efficient Query Dissemination in Distributed Sensor Networks," Proc. URAI, 511-514, 2010.

[8] D. Karaboga, "An idea based on bee swarm for numerical optimization," Tech. Rep. TR-06, Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department, 2005.

[9] D. Karaboga and B. Basturk. "A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm," J. Global Optim, Vol. 39, pp. 459-471, 2007.

[10] D. Karaboga and B. Basturk. "On the performance of artificial bee colony (ABC) algorithm," Appl. Soft Comput., Vol. 8, pp. 687-697, 2008.

[11] J. Kennedy & R. C. Eberhart, "Particle swarm optimization," Proc. ICNN, 1942-1948, 1995.

[12] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, & H. Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks," Proc. 33th HICSS, 3005-3014, 2000.