

WMN-SA システムの評価：メッシュクライアント密度がメッシュルータ配置最適化に与える影響

坂本 真仁^{1,a)} 小田 哲也¹ クラ エリス² バロリ レオナルド^{2,b)} 池田 誠^{2,c)}

概要：近年、広帯域で頑健性・耐障害性の高いネットワークを安価に実現する技術として、固定の有線ネットワークに依存せずに柔軟なネットワーク構成が可能な Wireless Mesh Networks (WMN) に注目が集まっている。我々はこれまでに、WMN のメッシュルータ配置最適化に Simulated Annealing (SA) を用いる WMN-SA を提案した。本稿では WMN-SA におけるメッシュクライアント数がメッシュルータ最適化配置にどのような影響を与えるのかを調べ、その評価を行う。シミュレーション結果から、現実の環境を基に想定すべきメッシュクライアント配置分布が明確である場合、想定するメッシュクライアント密度が高ければ高いほど、WMN-SA は性能をより高く発揮できることがわかった。

キーワード：無線メッシュネットワーク、WMN-SA、メッシュクライアント数、メッシュルータ配置問題

Effect of the Mesh Clients Density on Optimizing Mesh Routers Placement: Evaluation Using WMN-SA System

SHINJI SAKAMOTO^{1,a)} TETSUYA ODA¹ ELIS KULLA² LEONARD BAROLLI^{2,b)} MAKOTO IKEDA^{2,c)}

Abstract: In recent years, Wireless Mesh Networks (WMNs) are attracting a lot of research attention because of their low cost nature that makes them attractive for providing wireless Internet connectivity. We have proposed and implemented a simulation system using Simulated Annealing (SA) for node placement problem in WMNs called WMN-SA. We evaluate the effect of different SA parameters and different number of mesh clients using our proposed system. From the simulation results, we found that for the same distribution of clients when the mesh clients density is increased, WMN-SA performs better.

Keywords: Wireless Mesh Networks, WMN-SA, Number of mesh clients, Mesh routers placement problem.

1. はじめに

近年、広帯域で頑健性・耐障害性の高いネットワークを安価に実現する技術として、固定の有線ネットワークに依存せずに柔軟なネットワーク構成が可能な無線メッシュ

ネットワーク (Wireless Mesh Networks: WMN) [1-5] に注目が集まっている。WMN で使用するノードをメッシュノードと呼ぶ。本稿では、メッシュルータとメッシュクライアントという2つのタイプのメッシュノードを用いる。メッシュルータは、WMN を構成するためにマルチホップ機能を有している。マルチホップ機能を有することにより、各ルータとクライアント間の通信距離を縮めることができる。これにより、送受信に必要な最低電力は通信距離の2乗に比例して上昇することがわかっているため、通常のルータより少ない送信電力でカバレッジを提供することができる。また、メッシュルータは経路の自己修復機能を有するため、頑健性の高いネットワークを構築する事が可

¹ 福岡工業大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Fukuoka Institute of Technology, Japan

² 福岡工業大学情報工学部
Faculty of Information Engineering, Fukuoka Institute of Technology, Japan

a) shinji.t.sakamoto@gmail.com

b) barolli@fit.ac.jp

c) m-ikeda@fit.ac.jp

能である。

しかしながら、WMNは無線端末で構成されるため、メッシュルータの配置箇所はネットワーク全体の接続性に影響を与える。メッシュルータ配置を最適化することにより、ネットワークの様々な性能が向上するため、メッシュルータ配置問題はWMNにおける最も重要な最適化問題の一つである。ただし、メッシュルータ配置問題は離散型のミニサム基準の施設配置問題で、いわゆるP-Median問題に属するため、NP困難な問題である[6]。最適化のためには、ヒューリスティックな手法が有効であることがわかっており、我々のグループではSimulated Annealing(SA)を用いたメッシュルータ配置システムであるWMN-SAを実装している[7]。本稿では、WMN-SAシステムにおいてSAのパラメータ変化がメッシュルータ最適化配置にどのような影響を与えるのかを調べ、その評価を行う。

2. WMN

WMNはIEEE802.11sにより標準化が進められている[8]。無線アドホックメッシュは当初軍事用に開発され、20世紀末以降、戦場に近しい災害時の環境に応用することを目的として進歩を遂げた。WMN対応のメッシュルータは、米ストリクス・システムズ、米トロポス・ネットワークス、米ノーテル・ネットワークス等が以前から製品化している。ある端末が故障や通信障害などで経路の寸断が発生しても継続的に接続・再構成を繰り返す。さらに自己組織化を図るネットワークで、目的の送信先に達するまでノードからノードへデータ転送を行う。また、ルータ同士が対等な立場で情報のやりとりを行うためWMNはP2P通信でネットワーク構築を行う無線アドホックネットワーク[9]の一種である。

WMNの各無線端末は自律的にマルチホップネットワークを構成する。WMNでは、Infrastructure/Backbone(I/B) WMNというアーキテクチャが最も多く使用されている。このアーキテクチャは、既存の無線ネットワークとの統合が可能である。本研究ではこのアーキテクチャについて検討する。I/B WMNはその役割によって、次の4種類のノードに分類される[10]。

MP (Mesh Point)

無線メッシュネットワークを構成するために必要なメッシュ機能を実装したノードであり、Station(STA)は收容しない。MPの機能はソフトウェアによって実現でき、PCや情報家電機器、AP、携帯端末に実装される。WMNのネットワーク内ではハブ・ブリッジのような役割をもつ。

MAP (Mesh Access Point)

MPの機能とAPの機能を実装したノードである。MAPは無線LANメッシュネットワークを構築する

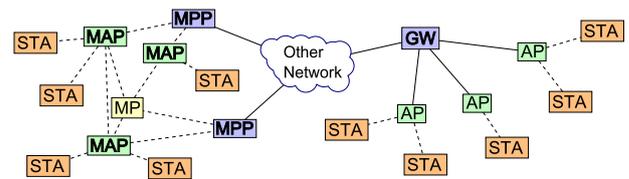


図1 WMN(左)と従来の無線ネットワーク(右)のイメージ図
Fig. 1 A comparison of WMN (left) and traditional wireless network (right).

だけでなく、メッシュ機能を実装していない無線LAN端末であるSTAからの接続を收容する機能も有しているノードである。

MPP (Mesh Portal Point)

メッシュ機能と、無線LANメッシュネットワークから他のネットワーク等の異なる分散システムとの接続のためのゲートウェイ機能を実装したノードである。

STA (Station)

メッシュ機能を有さない従来型無線LAN端末のこと。

図1にWMNと従来の無線ネットワークの比較イメージを示す。図1に示した通り、ゲートウェイの役割を果たすMPPと外部ネットワーク以外の接続は全て無線で実現される。

従来のシングルホップの無線LANでは、ネットワーク全体を統括するゲートウェイが故障すると、ネットワーク全体が動作不能というSingle Point of Failure(SPF)に陥ることになっていた。しかし、WMNであれば自己修復機能を有するため信頼性は高い。外部ネットワークと接続できるMPPは複数設置することができるため、通常は1つのMPPを常時接続しておき、もう1つのMPPのゲートウェイ機能はウォームスタンバイ状態にしておくことで、SPFに陥ることがなく、ネットワークの信頼性の向上につながる。

さらに、WMNのネットワークはホモジニアスネットワークであるため機器管理は簡単である。以上のことから、メッシュルータをMP, MAP, MPPとして使用することが有効である。

2.1 メッシュルータ配置問題

メッシュルータ配置問題は以下のように定義できる。離散平面であるグリッド領域上で、任意の分布で固定配置されたメッシュクライアントを考慮し、WMNのポテンシャルを最大限に利用するためにメッシュルータの配置を最適化する。メッシュルータ配置問題は、離散型の施設配置問題に属する。メッシュルータ配置問題では、ノードはメッシュルータとメッシュクライアントであり、そのエッジをWMN内のリンクとする。目的関数として、WMNのメッシュルータの接続数と、メッシュルータがカバーしている

メッシュクライアント数を最大化する。

これにより、ネットワークにおける接続性の向上、ユーザカバレッジとスループットの最大化、エネルギー消費量や導入コスト、通信遅延の最小化などが期待できる [11–14].

2.2 メッシュルータ配置最適化

WMN の性能はメッシュルータの配置に依存するため、本研究では最適化のために接続性に着目したメッシュルータ配置を行う。WMN のメッシュルータの接続台数が大きければ接続性も高くなる。そのため、WMN 内のメッシュルータ同士の接続数の最大化を目的とする。この WMN 内のメッシュルータ同士の接続数の成分を Component として扱う。Component が大きいほど通信範囲が広がるためメッシュクライアントの接続可能エリアが増える。最大の Component を Giant Component (GC) と呼び、Component が全て接続した状態であれば通信範囲が最大になる。そのため、メッシュルータ配置は目的関数として Size of GC (SGC) を第 1 条件とする。また、接続性を考慮するため、メッシュクライアントのカバーも Component の最大化をしつつ求めなければならない。そのため、Component によるメッシュクライアントのカバー数である Number of Covered Mesh Clients (NCMC) も目的関数とする。

3. SA

SA は最適化問題など NP 困難な問題に対して効果が高い確率的近似解法の一つであり、その原理は物理現象の焼き鈍し (Annealing) にヒントを得ている [15, 16]. 焼き鈍しの物理現象では高温物質の粒子が持つエネルギーは初めはランダムに広がり、エネルギーは散乱しているが、ゆっくりと温度を下げることによって粒子は並びが整った状態で、整列された基底状態、すなわちエネルギーの最も低い状態へと到達する。ここでのエネルギーを最適化のコストとして見立て SA は構成されている。

SA は理論的に最適解への確率的収束性が示せるといった非常に興味深い性質を持っている [17]. 実際に近似度の高い解を得ることができ、効果的なメタヒューリスティクスの代表的な手法である。

SA のプロセスは解 S_n が与えられ、そのコストを $f(S_n)$ とする。次に解 S_n から近傍解 S_{n+1} が生成され、その解のコストを $f(S_{n+1})$ とする。ここで、近傍解 S_{n+1} のコスト $f(S_{n+1})$ が解 S_n のコスト $f(S_n)$ より改善されている場合、近傍解 S_{n+1} に移動する。改善されていない場合、解 S_n と近傍解 S_{n+1} のコストの差 $f(S_{n+1}) - f(S_n)$ とその時点での温度パラメータに対応する受理基準に基づく確率を用いて、近傍解 S_{n+1} への移動が否か決める。

現時点での解に対して同様な操作を反復し、解の系列が形成されていく。この反復の過程で徐々に温度パラメータ

Algorithm 1 : Pseudo-code of SA.

```
t := 0
Initialize T
s0 := Initial_Solution()
v0 := Evaluate(s0)
while (stopping condition not met) do
  while t mod MarkovChainLen = 0 do
    t := t+1
    s1 := Generate(s0, T) // Move
    v1 := Evaluate(s1)
    if Accept(v0, v1, T) then
      s0 := s1
      v0 := v1
    end if
  end while
  T := Update(T)
end while
return s0
```

を下げていくことにより、その解の系列は最小化されたコストへと変化していくプロセスとなる。

温度パラメータと解を受け入れる仕組みを導入することにより、近傍探索アルゴリズムにおける局所解への落ち込みを防ぐキックアップの役割を果たし、より良い解への探索を実現している。

SA は近傍探索アルゴリズムの特徴である反復を基調とし、改悪する解への移動を許すところが特徴である [18]. したがって、その反復過程の実現は近傍探索を基盤にすることになり、解の移動に関しては、他の局所探索法などと同様な近傍を定義しなければならない。すなわち、SA を構成するには解表現、コスト関数、近傍構造、更には冷却スケジューリング、反復スケジューリングの定義が必要である。

SA アルゴリズムの擬似コードを Algorithm 1 に示す。SA は、理論的には無限に近い移動を繰り返すことにより、最適解に収束するアルゴリズムである。しかし、実際の適用において、無限に近い移動は困難な問題でしかない。そこで、実行時間内で実行が終了し、より最適解に近い解が求まるように、パラメータを調整し利用することとなる。すなわち、計算時間と解の質を鑑み、温度パラメータを有効に活用する必要がある。その際の冷却スケジューリングが重要になる。

4. メッシュルータ配置最適化への SA の適用

本研究に用いる SA は多目的最適化を目的としているため、解の評価関数に重み付けを施す [19]. メッシュルータ配置問題は離散型の施設配置問題に属するため、NP 困難な問題となる。そこで、メタヒューリスティック手法である SA を用いてメッシュルータ配置問題の最適化を図る。メッシュクライアントの配置分布は指数分布、一様分布、正規分布、ワイブル分布を用いる。

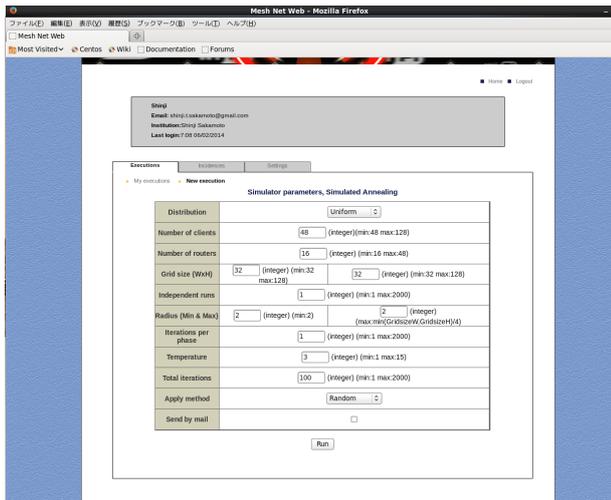


図 2 WMN-SA の Web インターフェイス
Fig. 2 Web Interface for WMN-SA.

表 1 入力パラメータ

Table 1 Input parameters.

パラメータ	入力値
メッシュクライアント分布	指数分布
エリアサイズ	640m × 640m
メッシュルータ数	16
メッシュクライアント数	48, 88, 128
メッシュルータの通信可能距離	25m, 35m, 45m 55m, 65m, 75m, 85m
SA 初期温度パラメータ	1
フェイズ毎の繰り返し回数	9
総繰り返し回数	2000

て、横軸はフェイズ数を示し、縦軸は SGC と NCMC の割合を示している。図 5 では、WMN-SA による最適配置の WMN トポロジを示す。

図 4(a) より SGC はメッシュクライアント数に関わらず全ての場合で 100% まで達している。図 4(b) より、NCMC もメッシュクライアント数によらず、200 フェイズ以内に高いカバー率を達成している。図 4 ではメッシュクライアント数による違いはほとんど見られなかった。

しかしながら、図 5 ではメッシュクライアント数が多ければ多いほどメッシュルータは有効に利用されているとともに、メッシュクライアント分布により適した配置となっている。具体的には、図 5(a) において、WMN のネットワークトポロジはメッシュクライアント分布から迂回する形でコンポーネントを形成している。またそのトポロジはツリー型である。これに対して、図 5(c) ではメッシュクライアント分布上にメッシュルータが無駄なく配置されており、ネットワークトポロジもメッシュ型を形成している。

以上より、メッシュクライアント分布が明らかな場合においてはメッシュクライアントは多ければ多く想定するほど確率分布のメッシュクライアント配置の場合、メッシュルータ配置最適化はより堅牢なものになり、WMN-SA の性能を発揮することができる。

WMN-SA は SA 初期温度パラメータによって許容解の程度を操作し局所的最適解に陥る可能性を下げる工夫を施しているが、少ないメッシュクライアント数の場合、WMN のネットワークトポロジはメッシュクライアント分布から迂回する形でコンポーネントを形成した。その要因の一つとして、少ないメッシュクライアント数であれば、分布密度が低い場所にはメッシュクライアントが初期配置されない可能性がある。そのため評価関数の条件を満たす解候補が増え、結果として収束しやすい解候補も増える。

単純にメッシュクライアント数が多ければ、理想的なメッシュクライアント分布^{*1} はさらに忠実に再現される。そのため局所的最適解に収束したとしても、その解候補は大域的最適解に近い解に収束すると考えられる。このこと

*1 本シナリオの場合は指数分布

5. シミュレーション

5.1 シミュレーション設定

提案・実装したシミュレータを本稿では WMN-SA と呼ぶ。WMN-SA の Web ユーザインターフェイスを図 2 に示す。WMN-SA ではシミュレーションモデルとして障害物のないグリッド平面上で行う。

シミュレーション結果を計る指標として、SGC と NCMC の 2 種類を用いる。SGC は、各メッシュルータ間の接続数の最大値を表し、NCMC はメッシュルータの接続可能範囲に存在するメッシュクライアントの数を表している。このとき、接続性の向上のためにはバックボーンネットワークの最大化が重要であるため、第 1 目的関数 f_1 を SGC、第 2 目的関数 f_2 を NCMC とする。この 2 つの目的関数を最大化するために階層最適化アプローチを行う。このアプローチにおいて、 f_1 と f_2 の間にはパレート効率の関係があるため、 f_1 が f_2 を優越するようにした。

シミュレーションに用いる入力パラメータを表 1 に示す。フェイズ毎の繰り返し回数は 9、総繰り返し回数は 2000 で固定とし、エリアサイズについては 64×64 のグリッドを用意し、メッシュルータの通信可能距離については、セルのサイズで表現し計算を行うため図 3 のように定める。1 セルあたりの面積を $10\text{m} \times 10\text{m}$ ($d = 10\text{m}$) と想定し、各メッシュルータの通信可能距離を 2 ~ 8 グリッドと設定する。つまり、エリアサイズは $640\text{m} \times 640\text{m}$ であり、メッシュルータ 1 台の通信可能距離は一律な確率で 25m から 85m までの範囲を 10m 単位で 7 種類用いる。また、性能評価のために、メッシュクライアント数が 48, 88, 128 の 3 種類を比較する。

5.2 シミュレーション結果

シミュレーション結果を図 4, 図 5 に示す。図 4 におい

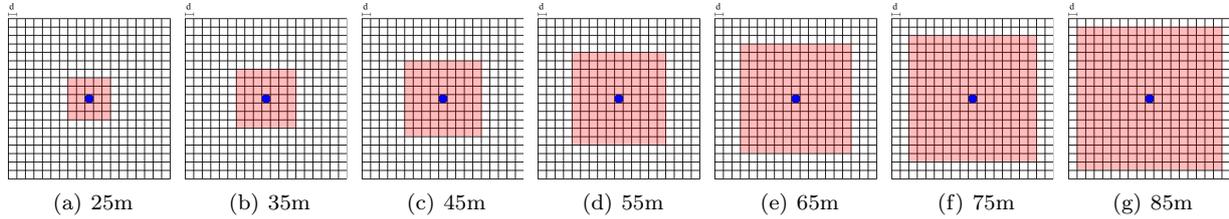


図 3 WMN-SA 内でのメッシュルータ 1 台の通信可能距離
 Fig. 3 Communication distance for a mesh router in WMN-SA.

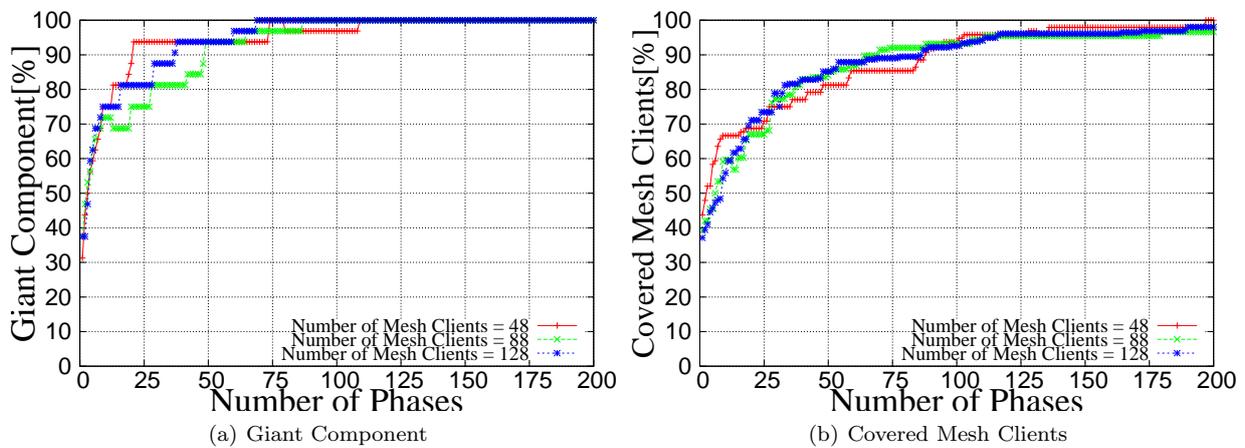


図 4 異なるメッシュクライアント数における WMN-SA の性能比較
 Fig. 4 Comparison for different number of clients on Exponential distribution.

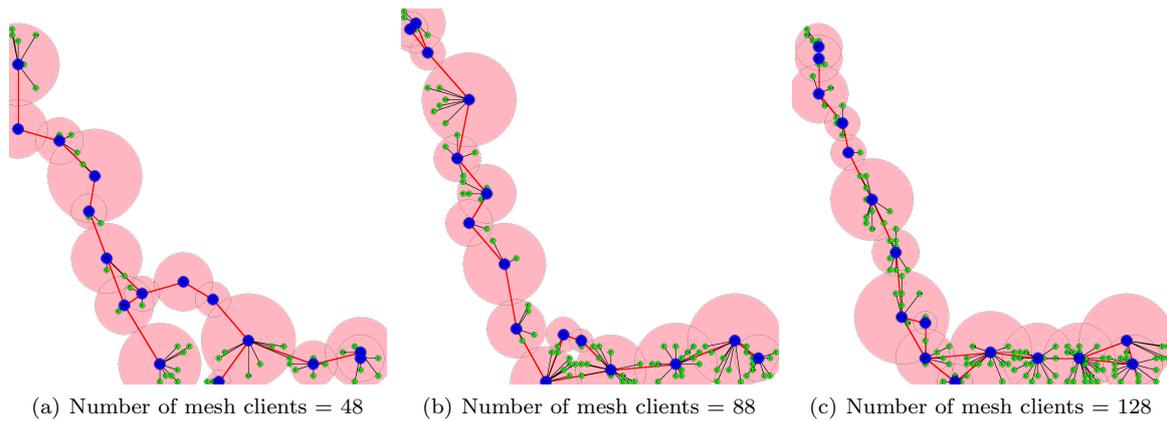


図 5 異なるメッシュクライアント数ごとの WMN トポロジの可視化
 Fig. 5 Visualization of WMNs for different number of clients on Exponential distribution.

から、実環境において WMN-SA を適用する環境を十分に調べ、クライアント分布を適切に定義することが非常に重要である。

また、WMN-SA においては、スループット等の通信特性を一切考慮せず、接続性についてのみの考慮である。そのため、メッシュルータは忠実に再現されたメッシュクライアント分布に対して接続性の観点から配置最適化を行うことができる。

6. むすび

本稿では、WMN のメッシュルータ配置最適化に SA を用いて行う WMN-SA のパラメータ変化がメッシュルータ最適化配置にどのような影響を与えるのかを調べ、その評価を行った。

シミュレーション結果から、メッシュクライアント密度を高めれば高く想定するほど、WMN-SA は性能をより高く発揮できる。特にメッシュクライアント分布が明確であり確率分布で表現できる場合において、より高接続性を有するネットワークになる。

今後は、提案手法を用いて様々なシナリオでの評価を行いたい。また、他のメッシュルータ配置手法との比較検証を行いたい。加えて、本稿の配置結果におけるネットワークのスループット等、通信特性についてもシミュレーションを行う予定である。

謝辞 本研究の一部は日本学術振興会科研費の助成によって行われた。ここに謝意を記す。

参考文献

- [1] Akyildiz, I. F., Wang, X. and Wang, W.: Wireless mesh networks: a survey, *Computer Networks*, Vol. 47, No. 4, pp. 445–487 (2005).
- [2] Franklin, A. and Murthy, C.: Node Placement Algorithm for Deployment of Two-Tier Wireless Mesh Networks, *IEEE GLOBECOM-2007*, pp. 4823–4827 (2007).
- [3] Held, G.: *Wireless Mesh Networks*, Auerbach Publications (2005).
- [4] 間瀬憲一, 阪田史郎: アドホック・メッシュネットワーク: コピキタスネットワーク社会の実現に向けて, コロナ社 (2007).
- [5] Hoshi, T., Kumata, Y. and Koyama, A.: A Proposal and Evaluation of Access Point Allocation Algorithm for Wireless Mesh Networks, *Proc. of International Conference on Network-Based Information Systems (NBIS-2013)*, pp. 389–394 (2013).
- [6] Garey, M. and Johnson, D.: *Computers and Intractability; A Guide to the Theory of NP-Completeness*, W. H. Freeman & Co. New York, NY, USA (1979).
- [7] Sakamoto, S., Oda, T., Kulla, E., Ikeda, M., Barolli, L. and Xhafa, F.: Performance Analysis of WMNs Using Simulated Annealing Algorithm for Different Temperature Values, *Proc. of The 7th International Conference on Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems (CISIS-2013)*, pp. 164–168 (2013).
- [8] Aoki, H., Takeda, S., Yagyu, K. and Yamada, A.: IEEE 802.11s wireless LAN mesh network technology, *NTT DoCoMo Technical Journal*, Vol. 8, No. 2, pp. 13–21 (2006).
- [9] 高橋義彦, 大和田泰伯, 須田利章, 間瀬憲一: 大規模無線アドホックネットワークテストベッドの開発, *信学論 (B)*, Vol. 89, No. 6, pp. 836–848 (2006).
- [10] 阪田史郎, 青木秀憲, 間瀬憲一: アドホックネットワークと無線 LAN メッシュネットワーク, *信学論 (B)*, Vol. J89-B, No. 6, pp. 811–823 (2006).
- [11] 柳浦睦憲, 茨木峻秀: 組み合わせ最適化-メタ戦略を中心として, 朝倉書店 (2001).
- [12] Xhafa, F., Bravo, A., Barolli, A. and Takizawa, M.: An Interface for Simulating Node Placement in Wireless Mesh Networks, *Network-Based Information Systems (NBIS), 2012 15th International Conference*, IEEE, pp. 326–333 (2012).
- [13] 河村直哉, 萬代雅希, 渡辺 尚: スマートアンテナを用いるアドホックネットワークのさらし端末問題への対処法について, *情処学研報, ITS-35*, Vol. 2008, No. 107, pp. 33–38 (2008).
- [14] Xhafa, F., Sanchez, C., Barolli, L. and Miho, R.: An annealing approach to router nodes placement problem in wireless mesh networks, *Proc. of International Conference on Complex, Intelligent and Software Intensive Systems (CISIS-2010)*, pp. 245–252 (2010).
- [15] Kirkpatrick, S., Jr., D. G. and Vecchi, M. P.: Optimization by simulated annealing, *Science*, Vol. 220, No. 4598, pp. 671–680 (1983).
- [16] Van Laarhoven, P. J. and Aarts, E. H.: *Simulated Annealing*, Springer (1987).
- [17] 相吉英太郎, 安田恵一郎: メタヒューリスティクスと応用, 電気学会 (2007).
- [18] 坂本真仁, 小田哲也, 常馨月, バロリレオナルド, 池田誠: フェイズ毎の繰り返し回数と温度パラメータを考慮した WMN-SA の性能評価, *情処学研報, DPS-157*, Vol. 2013, No. 1, pp. 1–6 (2013).
- [19] Moghaddam, A., Amodeo, L. and Yalaoui, F.: Simulated annealing for a bi-objective scheduling problem with rejection: comparative study, *META* (2010).