

メッシュルータ配置問題のための ドロネー三角分割とCCMに基づく焼きなまし法

平田 蒼人・小田 哲也^{*}・齋藤 伸樹・片山 謙吾^{*}

岡山理科大学大学院工学研究科情報工学専攻

^{*}岡山理科大学工学部情報工学科

(2021年11月1日受付、2021年12月9日受理)

1. はじめに

Wireless Mesh Network (WMN) [1, 2, 3, 4]は、広範囲に安定した無線ネットワークを安価に提供することのできる無線通信技術として近年注目を集めている。WMNは、マルチホップ無線通信で接続されたメッシュルータとメッシュクライアントの2つのノードで構成される。メッシュルータはアクセスポイントとして機能し、他の複数のメッシュルータと網目状に相互接続し、一つのネットワークを構成する。WMNの各ノードはマルチホップリンクを介して通信し、一部のノードが故障したとしても他の経路での通信が可能であるため通信の安定性が高い。その安定性の高さから、工場のIoT機器のためのネットワークや、災害時の一時的なネットワークとして用いられている。一方、メッシュルータはバックボーンを有さない通信方式が多用されるため、メッシュルータの配置箇所は通信の伝送損失、設置コスト、運用の複雑さ等に大きく影響する。そのメッシュルータの配置を、接続性を考慮して最適化することで、これらの問題の解決、また通信性能の向上が可能となる。そこでメッシュルータの配置を最適化する問題を、メッシュルータ配置問題としてOdaが定義している[5]。我々の先行研究[6, 7, 8, 9, 10, 11, 12]では遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm: GA) [13]、山登り法 (Hill Climbing: HC) [14]、焼きなまし法 (Simulated Annealing: SA) [15]、タブーサーチ (Tabu Search) [16]、粒子群最適化 (Particle Swarm Optimization: PSO) [17]のようなメタヒューリスティックな手法を提案、評価してきた。また著者は全てのメッシュルータの通信範囲がリンクしたメッシュルータのグループをランダムに生成する手法、先見近傍解生成法 (Coverage Construction Method: CCM) [18]を提案した。またその発展として先見近傍解生成法に基づく山登り法 (CCM-based Hill Climbing: CCM-based HC) [19]、先見近傍解生成法に基づく焼きなまし法 (CCM-based Hill Simulated Annealing:

CCM-based SA) [20]を提案し、CCMを用いた提案システムを様々なシミュレーション設定で比較、検討した [21, 22, 23]。CCMを用いた提案システムは、正規分布や一様分布でランダムに生成されたメッシュクライアントの多くをカバーすることのできるメッシュルータの配置を導出することが出来た。

本稿ではこれまで提案してきた手法をより現実的なメッシュクライアントの配置に対応するために特化したメッシュルータ配置最適化手法として、ドロネー三角分割とCCMに基づく焼きなまし法を提案する。また提案システムの評価指標としてSGC (Size of Giant Component) とNCMC (Number of Covered Mesh Clients) を考慮した。

2. メッシュルータ配置問題

この問題では、複数のメッシュルータとメッシュクライアントを固定的に配置する2次元の連続空間を考慮する。メッシュルータ配置問題は p -median問題の一特化であるためNP困難問題となる。この問題の目的は、ネットワークの接続性とメッシュクライアントの被覆数を最大化するような、2次元連続領域へのメッシュルータの位置割り当てを最適化することである。この問題ではメッシュルータの連結グラフをComponentとし、最大のComponentをGiant Component (GC)とする。GCが存在するComponent全てが接続された状態であれば通信範囲が最大となるため、Size of GC (SGC)を目的関数とする。また問題領域に存在する多くのノードと接続することを目的とするため、ここでメッシュルータによるメッシュクライアント被覆数の最大化を求める。そのためメッシュクライアントの被覆数であるNumber of Covered Mesh Clients (NCMC)を目的関数とする。問題領域となる離散平面上に、メッシュクライアントは固定として存在し、この問題領域でメッシュルータの配置を最適化する問題をメッシュルータ配置問題と呼ぶ。

3. 提案手法

ここでは提案手法について述べる。提案手法の疑似コードをAlg. 1, Alg. 2, Alg. 3に示す。

3.1 Coverage Construction Method

Algorithm 1 The method for randomly generating mesh routers.

Input: Placement list of mesh routers.

```

1: Set Number of mesh routers.
2: Generate mesh router [0] randomly in considered area.
3:  $i \leftarrow 1$ .
4: while  $i < \text{Number of mesh routers}$  do
5:   Generate mesh router [i] randomly in considered area.
6:   if SGC is maximized then
7:      $i \leftarrow i + 1$ .
8:   else
9:     Delete mesh router [i].
10:  end if
11: end while

```

Alg. 1 メッシュルータランダム生成法

Algorithm 2 Coverage construction method.

Input: Placement list of mesh clients.

Output: Placement list of best mesh routers.

```

1: Set Number of loop for CCM.
2:  $i, \text{Current NCMC}, \text{Best NCMC} \leftarrow 0$ .
3:  $\text{Current mesh routers} \leftarrow \text{Alg. 1}$ .
4:  $\text{Best mesh routers} \leftarrow \text{Current mesh routers}$ .
5: while  $i < \text{Number of loop for CCM}$  do
6:    $\text{Current NCMC} \leftarrow \text{NCMC of Current mesh routers}$ .
7:   if  $\text{Current NCMC} > \text{Best NCMC}$  then
8:      $\text{Best NCMC} \leftarrow \text{Current NCMC}$ .
9:      $\text{Best mesh routers} \leftarrow \text{Current mesh routers}$ .
10:  end if
11:   $i \leftarrow i + 1$ .
12:   $\text{Current mesh routers} \leftarrow \text{Alg. 1}$ .
13:   $\text{Current NCMC} \leftarrow 0$ .
14: end while

```

Alg. 2 Coverage Construction Method

提案するメッシュルータ配置を生成するCoverage Construction Method (CCM)について述べる。CCMはランダムな配置かつ必ずSGCが最大値、つまりメッシュルータの無線通信範囲が全て接続された解を導出する手法である。CCMはこのSGCが最大化されたメッシュルータの配置をランダムに生成する手法、Alg. 1を指定した回数繰り返す。またそのループ中の最もNCMCが高いメッシュルータの配置をCCMの解とする。

3.2 CCMに基づく焼きなまし法

提案するCCMに基づく焼きなまし法について述べる。焼きなまし法 (SA: Simulated Annealing)は、ランダムな決定により状態遷移を行い、局所解からの脱出を行うことを可能にするメタヒューリスティクスの一手法である。焼きなまし法は金属加工における焼きなましをモデル化したものであり、状態遷移率

Algorithm 3 CCM-based SA.

Input: Placement list of mesh clients.

Output: Placement list of best mesh routers.

```

1: Set Number of loop for SA, Initial Temp, Final Temp.
2:  $\text{Current number of loop} \leftarrow 0$ .
3:  $\text{Current mesh routers} \leftarrow \text{Alg. 2 (Placement list of mesh clients)}$ .
4:  $\text{Best mesh routers} \leftarrow \text{Alg. 2 (Placement list of mesh clients)}$ .
5:  $\text{Current NCMC}, \text{Best NCMC} \leftarrow \text{NCMC of Current mesh routers}$ .
6: while  $\text{Current number of loop} < \text{Number of loop for SA}$  do
7:   Randomly choose an index of  $\text{Current mesh routers}$ .
8:   Randomly change coordinate of  $\text{Current mesh router}$  [chosen index].
9:    $\text{Current NCMC} \leftarrow \text{NCMC of Current mesh router}$ .
10:  if SGC is maximized then
11:     $r \leftarrow \text{Randomly generate in } (0.0, 100.0)$ .
12:     $\text{Eval} \leftarrow 10 \times (\text{Best NCMC} - \text{Current NCMC})$ 
13:     $T \leftarrow \text{Initial Temp} + (\text{Final Temp} - \text{Initial Temp}) \times \frac{\text{Current number of loops}}{\text{Number of loops for SA}}$ 
14:    if  $e^{-\frac{\text{Eval}}{T}} \geq 1.0$  then
15:       $\text{Best NCMC} \leftarrow \text{Current NCMC}$ .
16:       $\text{Best mesh routers} \leftarrow \text{Current mesh routers}$ .
17:    else if  $e^{-\frac{\text{Eval}}{T}} > r$  then
18:       $\text{Best NCMC} \leftarrow \text{Current NCMC}$ .
19:       $\text{Best mesh routers} \leftarrow \text{Current mesh routers}$ .
20:    else
21:      Restore coordinate of  $\text{Current mesh routers}$  [chosen index].
22:    end if
23:  else
24:    Restore coordinate of  $\text{Current mesh routers}$  [chosen index].
25:  end if
26:   $\text{Current number of loops} \leftarrow \text{Current number of loops} + 1$ .
27: end while

```

Alg. 3 CCMに基づく焼きなまし法

(STP: State Transition Probability)は解の評価 (Eval: Evaluation of placement)と温度 (T: Temperature)によって制御される。提案手法では、現在の解の近傍を探索し、STPに応じて状態を遷移する一連の流れを設定したループ数繰り返すことによって最適解を求める。メッシュルータ配置問題では解の近傍探索を選択した1つのメッシュルータの座標をランダムに変化させることとしている。またCCMは必ずSGCが最大化された配置を導出するが、焼きなまし法では近傍探索時にSGCが最大化されていない配置を選択する可能性がある。提案手法ではSGCが最大化されているかどうかを確かめるためにメッシュルータの隣接リストに対して深さ優先探索 (DFS: Depth First Search) [24]を用いた到達可能性判定を行う。提案手法の近傍探索時における状態遷移率を式 (1)~(3)に示す。

$$\text{Eval} \leftarrow 10 \times (\text{最大NCMC} - \text{現在の解のNCMC}) \quad (1)$$

$$T \leftarrow \text{初期温度} +$$

$$(\text{最終的な温度} - \text{初期温度}) \times \frac{\text{現在のループ数}}{\text{設定したループ数}} \quad (2)$$

$$\text{STP} \leftarrow e^{-\frac{\text{Eval}}{T}} \quad (3)$$

式 (1)において、メッシュルータ配置の評価 $Eval$ はNCMCのみを考慮している。これはSGCが最大化されていない解を導出した場合、その解を変更以前の解に戻すためである。式 (2)では温度減少関数を定義している。また式 (3)で示した状態遷移率 STP において、 e はネイピア数となっている。提案手法において状態遷移はSGCが最大化されている場合に $10 \times STP$ [%]の確率で行われる。提案手法ではこの状態遷移率に基づいてSGCが最大化されたメッシュルータの配置を解として導出する。また状態遷移式において、 T の値がループ数に応じて減少することによって状態遷移率が減少する。この状態遷移率の変化によって提案手法は最初は解を大胆に変更するが、温度が下がるにつれて解を収束させる。

3.3 ドロネー三角分割とCCMに基づく焼きなまし法

提案手法であるドロネー三角分割とCCMに基づく焼きなまし法について述べる。これまで紹介してきた提案手法は性能評価実験の際、対象となるメッシュクライアントは正規分布、一様分布でランダムに生成したものとになっていた。従来のメッシュクライアントの配置におけるメッシュルータの配置最適化例を可視化したものを図1、図2に示す。提案手法は従来のメッシュクライアントの配置と比べて、より現実の状況に近いメッシュクライアントの配置に特化させたものとなっている。提案手法では、ドロネー三角分割によって得られるドロネー辺を用いる。ドロネー三角分割は地形図のモデリング等に用いられる手法であり、問題領域内の点群を頂点とする三角形を形成する。問題領域の分割には、問題領域内の点がどの点に近いかに基づいて問題領域を分割するボロノイ分割を用いる。ボロノイ分割によって得られるボロノイ領域の各境界は各点から等距離に存在する。ドロネー三角分割は、各点をボロノイ領域の隣接関係に応じた線で結び、三角形を作る。図3にドロネー三角分割とボロノイ分割の例を示す。図3から、ドロネー辺はボロノイ図の隣接関係を表していることが分かる。提案手法ではこのドロネー辺の座標をリスト化する。そしてCCMにおいてメッシュルータをランダムに生成する際に、このドロネー辺の座標リストの中からランダムに1つ座標を選択し、その座標にメッシュルータを生成する。その後、選択された座標をリストから消去し、生成したメッシュルータが他のメッシュルータと無線通信範囲が重なり合っているか衝突判定を用いて確かめる。重なり合っていない場合、生成したメッシュルータを削除する。この一連の操作を指定回数繰り返す。こうして得られた配置をCCMの解とする。またこのCCMの解を初期解として焼きなまし法を適用し、解を導出する。

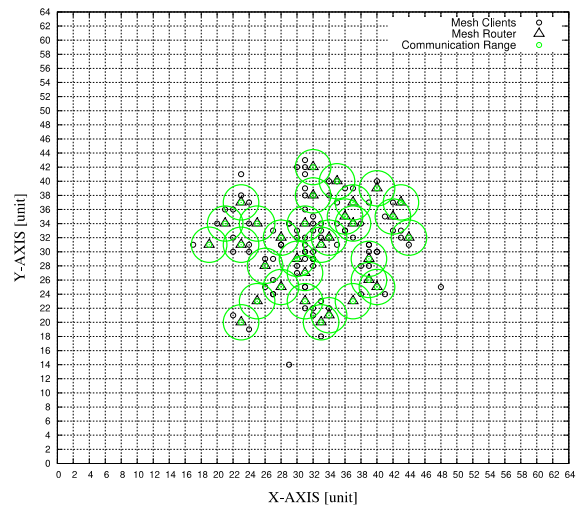


図1 正規分布における配置最適化例

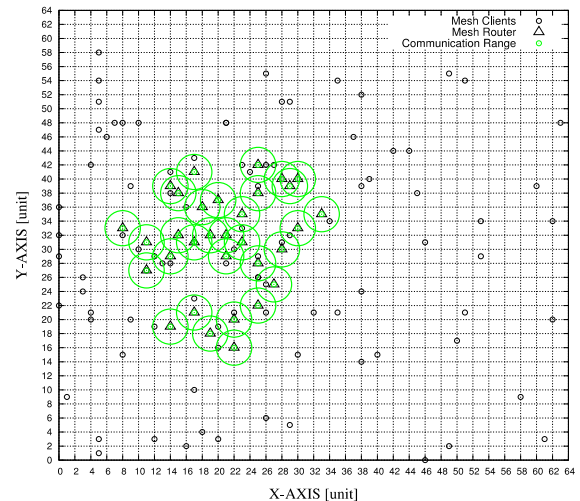


図2 一様分布における配置最適化例

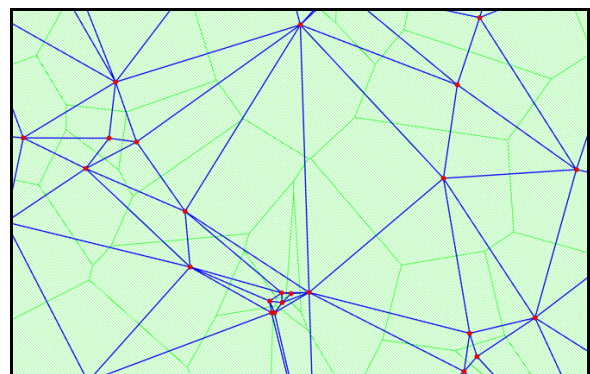


図3 点群に対するボロノイ分割とドロネー辺

4. シミュレーション結果

4.1 シミュレーション設定

シミュレーションで用いたパラメータを表1に示す。

表1 シミュレーションパラメータ

問題領域の横軸の長さ	260
問題領域の縦軸の長さ	180
問題領域の北緯 [度]	34.671
問題領域の東経 [度]	133.936
地図画像の縮尺	1:2760
メッシュルータの配置数 [個]	256
メッシュルータの通信範囲の半径	4
メッシュクライアントの配置数 [個]	3089
ループ数(CCM) [回]	3000
ループ数(焼きなまし法) [回]	100000
初期温度 [°C]	100
最終的な温度 [°C]	1

本シミュレーションでは、問題領域を岡山県岡山市北区JR岡山駅周辺として設定し、問題領域内に存在する避難施設をメッシュクライアントとした。地図画像の作成にはオープンソースのGISアプリケーションであるQGISを用いた。また、地図画像における建物のシェープファイルはOpen Street Mapを、避難施設の地理データは岡山県が公開しているオープンデータ[25]を用いた。提案システムは作成した地図画像からメッシュクライアントの位置、ドローネー辺の座標などの情報を抽出し、システム内で使用できる形式に変換する。シミュレーションで使用した地図画像を図4に示す。図5では図4において赤色の点として存在している避難施設が含まれる建物を全て赤色にしたものとなっている。提案システムはこの赤色の建物を被覆するメッシュルータの配置を最適化する。

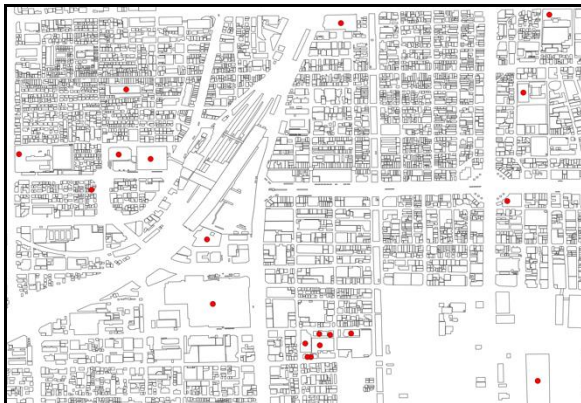


図4 地図画像

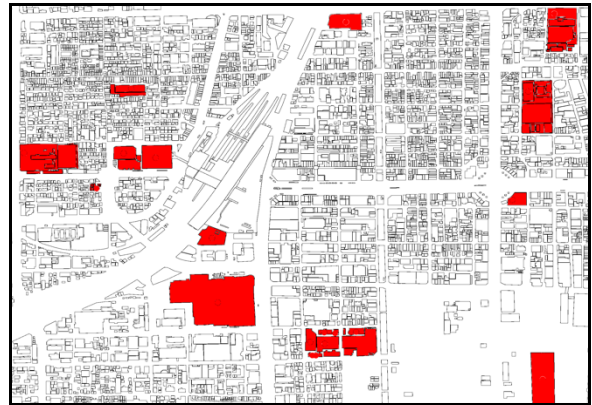


図5 避難施設

また図7内の赤色の点で示された避難施設を対象にドローネー三角分割を行う。ドローネー三角分割はQGIS内で実装されているものを用いた。ドローネー三角分割実行後の地図画像を図6に示す。

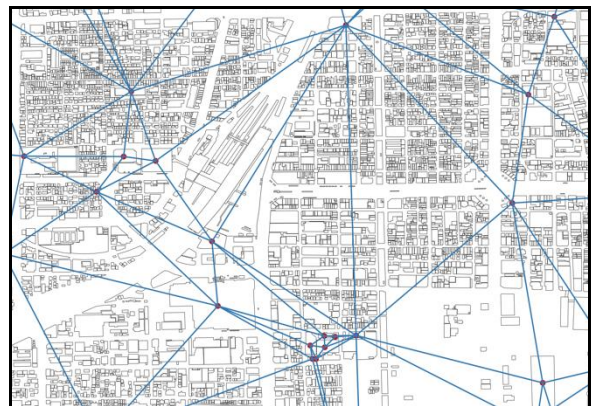


図6 ドローネー三角分割後の地図画像

ここで図5、図6から避難施設とドローネー辺のピクセルを抽出し、提案システムで使用可能な形式に変換する。図7、図8にそれぞれの情報を抽出、変換し可視化したものを示す。こうして抽出、変換された情報はそれぞれ提案システム内で、避難施設はメッシュクライアントとして、ドローネー辺はCCMのための座標リストとして用いられる。

4.2 シミュレーション結果

ここでは提案手法の評価を行う。本シミュレーションでは提案手法を100回実行した。シミュレーション結果を表2に示す。

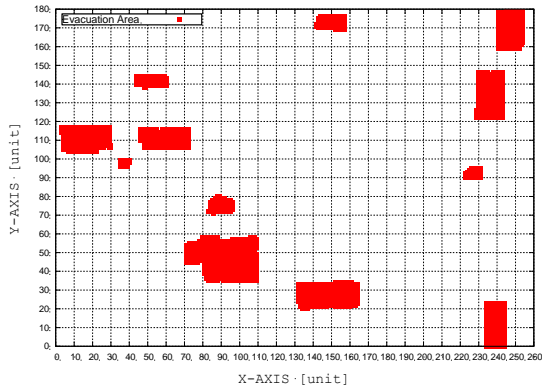


図7 抽出, 変換された避難施設

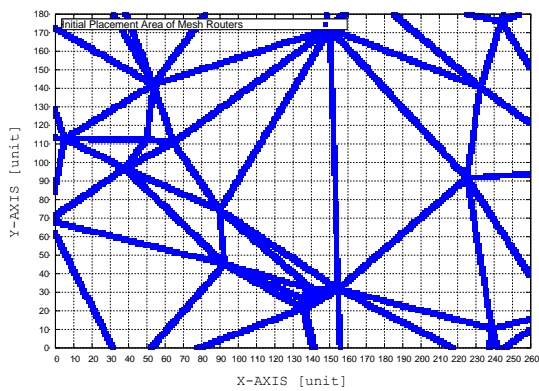


図8 抽出, 変換されたドロネー辺

表2 提案手法のシミュレーション結果

手法	最大SGC	平均SGC	最大NCMC	平均NCMC[%]
CCM	256	256	2118	64.788
SA	256	256	3089	95.161

シミュレーションでは、CCM, 焼きなまし法のどちらも常にSGCが最大となる解を導出した。またドロネー辺の座標を用いることで、初期解の生成を行うCCMにおいて平均して6割以上のメッシュクライアントを被覆することのできるメッシュルータの配置を導出することができた。また焼きなまし法においては、全てのメッシュクライアントを被覆することができ、平均して9割以上のメッシュクライアントを被覆する配置を導出することができた。

提案手法の可視化結果を図9, 図10に示す。図9ではCCMによってメッシュクライアントが図8で抽出, 変換されたドロネー辺上に配置されていることが分かる。また提案手法はドロネー辺の座標リストに基づく

CCMによって、離れた位置にあるメッシュクライアントを見つけることが出来たことが分かる。図10では提案手法が全てのメッシュルータを被覆することができる配置を導出していることが分かる。

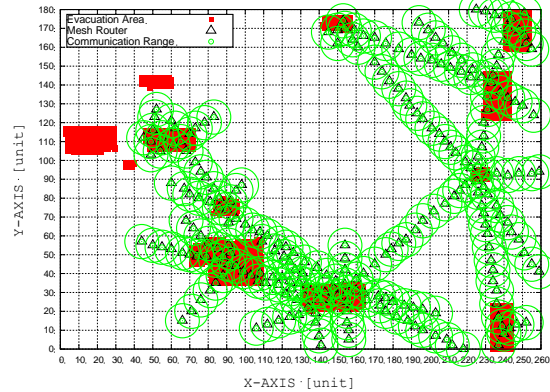


図9 CCMの解の可視化

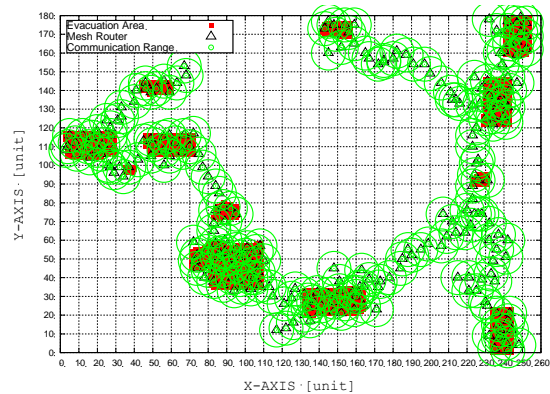


図10 SAの解の可視化

5. 結論

本稿ではメッシュルータ配置最適化のためのドロネー三角分割とCCMに基づく焼きなまし法を提案した。シミュレーション結果から、提案手法はほとんどのメッシュクライアントを被覆するメッシュルータの配置を導出することが出来たことが分かる。今後の研究では他の配置最適化手法との比較や、提案手法の改良を行っていく。

参考文献

- [1] I. F. Akyildiz, et. al., "Wireless Mesh Networks: a Survey", Computer Networks, Vol. 47, No. 4, pp. 445-487, 2005.
- [2] T. Oda, et. al., "Implementation and Experimental Results of a WMN Testbed in Indoor Environment Considering LoS Scenario", Proc. of The IEEE 29-th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (IEEE AINA-2015), pp.37-42, 2015.
- [3] J. Jun, et. al., "The Nominal Capacity of Wireless Mesh Networks", IEEE Wireless Communications, Vol. 10, No. 5, pp. 8-15, 2003.

- [4] O. Oyman, et. al., "Multihop Relaying for Broadband Wireless Mesh Networks: From Theory to Practice", IEEE Communications Magazine, Vol. 45, No. 11, pp. 116 – 122, 2007.
- [5] T. Oda, et. al. "WMN-GA: a Simulation System for WMNs and Its Evaluation Considering Selection Operators", Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, Vol. 4, No. 3, pp. 323-330, 2013.
- [6] T. Oda, et. al., "Evaluation of WMN-GA for different mutation operators", International Journal of Space-Based and Situated Computing, Vol. 2, No. 3, 2012.
- [7] M. Ikeda, et. al., "Analysis of WMN-GA Simulation Results: WMN Performance Considering Stationary and Mobile Scenarios", Proc. of The 28-th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications (IEEE AINA-2014), pp. 337-342, 2014.
- [8] T. Oda, et. al., "Analysis of Mesh Router Placement in Wireless Mesh Networks Using Friedman Test", Proc. of The IEEE 28-th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (IEEE AINA-2014), pp. 289-296, 2014.
- [9] T. Oda, et. al., "Effect of different grid shapes in wireless mesh network-genetic algorithm system", International Journal of Web and Grid Services, Vol. 10, No. 4, pp. 371-395, 2014.
- [10] T. Oda, et. al., "Analysis of Mesh Router Placement in Wireless Mesh Networks Using Friedman Test Considering Different Meta-heuristics", International Journal of Communication Networks and Distributed Systems, Vol. 15, No. 1, pp. 84-106, 2015.
- [11] T. Oda, et. al., "A Genetic Algorithm-based System for Wireless Mesh Networks: Analysis of System Data Considering Different Routing Protocols and Architectures", Soft Computing, Vol. 20, No. 7, pp. 2627-2640, 2016.
- [12] S. Sakamoto, et. al., "Performance Evaluation of Intelligent Hybrid Systems for Node Placement in Wireless Mesh Networks: A Comparison Study of WMN-PSOHC and WMN-PSOSA", Proc. of The 11-th International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing (IMIS-2017), pp. 16-26, 2017.
- [13] J. H. Holland, "Genetic Algorithms", Scientific American, Vol. 267, No. 1, pp. 66-73, 1992.
- [14] D. B. Skalak, "Prototype and Feature Selection by Sampling and Random Mutation Hill Climbing Algorithms", Proc. of The 11-th International Conference on Machine Learning (ICML-1994), pp. 293-301, 1994.
- [15] S. Kirkpatrick, et. al., "Optimization by Simulated Annealing", Science, Vol. 220, No. 4598, pp. 671-680, 1983.
- [16] F. Glover, "Tabu Search: A Tutorial", Interfaces, Vol. 20, No. 4, pp. 74-94, 1990.
- [17] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle Swarm Optimization", Proc. of The IEEE International Conference on Neural Networks (ICNN-1995), pp. 1942-1948, 1995.
- [18] A. Hirata, et. al., "Approach of a Solution Construction Method for Mesh Router Placement Optimization Problem", Proc. of The IEEE 9-th Global Conference on Consumer Electronics (IEEE GCCE-2020), pp. 467-468, 2020.
- [19] A. Hirata, et. al., "A Coverage Construction Method Based Hill Climbing Approach for Mesh Router Placement Optimization", Proc. of The 15-th International Conference on Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA-2020), pp. 355-364, 2020.
- [20] A. Hirata, et. al., "A Simulation System for Mesh Router Placement in WMNs Considering Coverage Construction Method and Simulated Annealing", Proc. of The 16-th International Conference on Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA-2021), pp. 78-87, 2021.
- [21] A. Hirata, et. al., "Simulation Results of CCM Based HC for Mesh Router Placement Optimization Considering Two Islands Model of Mesh Clients Distributions", Proc. of The 9-th International Conference on Emerging Internet, Data Web Technologies (EIDWT-2021), pp. 180-188, 2021.
- [22] A. Hirata, et. al., "A Coverage Construction and Hill Climbing Approach for Mesh Router Placement Optimization: Simulation Results for Different Number of Mesh Routers and Instances Considering Normal Distribution of Mesh Clients", Proc. of The 15-th International Conference on Complex, Intelligent and Software Intensive Systems (CISIS-2021), pp. 161-171, 2021.
- [23] A. Hirata, et. al., "A CCM-Based HC System for Mesh Router Placement Optimization: A Comparison Study for Different Instances Considering Normal and Uniform Distributions of Mesh Clients", Proc. of The 24-th International Conference on Network-Based Information Systems (NBIS-2021), pp. 329-340, 2021.
- [24] R. Tarjan, "Depth-First Search and Linear Graph Algorithms", SIAM Journal on Computing, Vol. 1, No. 2, pp. 146-160, 1972.
- [25] "おokayama 全県統合型GIS", <http://www.gis.pref.okayama.jp/pref-okayama/OpenData>, 2021-11-16.

A Delaunay triangulation and CCM-based SA approach for mesh router placement problem

Aoto Hirata, Tetsuya Oda*, Nobuki Saito and Kengo Katayama*

Graduate School of Engineering,

Okayama University of Science (OUS), Okayama, 1-1 Ridaicho, Kita-ku, Okayama 700-0005, Japan,

**Department of Information and Computer Engineering, Faculty of Engineering,*

Okayama University of Science (OUS),

1-1 Ridaicho, Kita-ku, Okayama 700-0005, Japan,

(Received November 1, 2021; accepted December 9, 2021)

The Wireless Mesh Networks (WMNs) enables routers to communicate with each other wirelessly in order to create a stable network over a wide area at a low cost and it has attracted much attention in recent years. There are different methods for optimizing the placement of mesh routers. In our previous work, we proposed a Coverage Construction Method (CCM), CCM-based Hill Climbing (HC) and CCM-based Simulated Annealing (SA) system for mesh router placement problem considering normal and uniform distributions of mesh clients.

In this paper, we propose a Delaunay triangulation and CCM-based Simulated Annealing (SA) approach for mesh router placement problem.

Keywords: Wireless Mesh Network; Mesh router placement problem; Simulated Annealing; Delaunay triangulation.