

スマートメーター・ゲートウェイに対する 設置コスト問題への進化計算の適用

Evolutionary Computational Approach to Finding Smart Meter/Gateway Placements in a Power Distribution System

青木 亮磨^{1*} 北澤 正樹¹ 寺野 隆雄¹
R. Aoki¹ M. Kitazawa¹ T. Terano¹

¹ 東京工業大学工学部情報工学科

¹ Tokyo Institute of Technology Department of Computer Science

Abstract: 本稿では, 配電システムの SmartMeter/Gateway 配置問題に対して進化計算アルゴリズム適用することによってより良い解を求めることを目的としている. 電力会社を中心に, 各家庭に SmartMeter の設置を進めている. 各家庭に設置される多数の SmartMeter を制御するためには, 最小数の高価な Gateway デバイスを配置することが必要である. また, SmartMeter は徐々に増えていくため, Gateway の配置にも時間的戦略が必要である. 進化計算を適用することによってこれら 2 つの問題を同時に解決し, 配置コストが格子状に Gateway を配置する既存の手法に比べて約半分になり, 問題規模の増加に対して計算時間を多項式時間に抑えることが可能であることを明らかにした.

1 序論

最近, 電力会社は各家庭に SmartMeter を設置することにより, 電力の需給計画や電力料金の管理等の自動化・高精度化を進めている. このような SmartMeter を数多く制御するためには, 高価な Gateway デバイスが必要である. よって, 何千もの SmartMeter に対して最小限の Gateway を複雑な距離, 幾何学的数及び数的制限の元に適正に配置することが必要である.

今回は埼玉県複数の都市をモデルに緯度方向に 16km 経度方向に 25km の範囲において SmartMeter を配置し, 配置された SmartMeter に対して Gateway を適正に配置することを目標とする. Gateway の制約は以下の通りである.

- SmartMeter との最大接続距離は 950m
- 1 台の Gateway につき, 最大 200 台の SmartMeter と接続できる

この Gateway に対して以下の条件を満たすような Gateway の配置を探索・決定するのが今回の問題である.

- 使用 Gateway 数を可能な限り小さくする
- Gateway と未接続の SmartMeter の数を 0 にする

今回, 埼玉県の複数の都市をモデルとして SmartMeter 1598 機を図 1 のように設置した. この設置した SmartMeter 1598 機について Gateway を配置を最適化する. なお, 地図の作成には R のパッケージ leaflet を用いた [16][17]. また, 地図には OpenStreetMap を用いた [18].

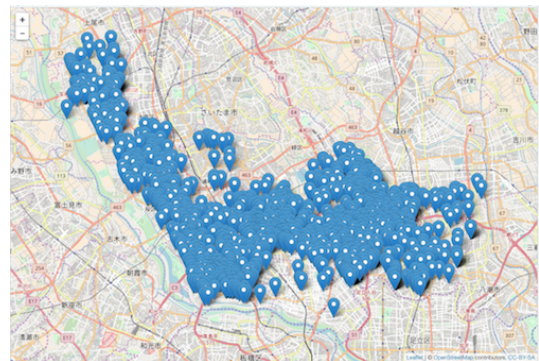


図 1: SmartMeter の配置

なお, 全ての 2 地点間の緯度経度からの距離の計算はヒュベニの公式を用いるものとする.

既存手法として, 格子状に Gateway を配置する方法がある. 無論コストの最小化は行われていない. Gateway と SmartMeter の最大接続距離が 950m であるので, 半径 950m の円に内接する正方形の一辺の長さ $950 \times 2 \div \sqrt{2} \times 1 \approx 1343$ より, 1343m 毎に Gateway を配置し, 全ての SmartMeter に接続するには Gateway が幾つ必要

*連絡先: 東京工業大学工学部情報工学科
〒226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259-J2-52
E-mail: aoki.r.ae@m.titech.ac.jp

かを考えれば良い。この時、格子状に配置すると 108 個の Gateway が必要なことがわかる。

本研究では設置されている SmartMeter からの距離的制限が存在するときの設置コスト問題に対して進化計算を適用することによってより良い解を求めることを目的とする。第一目標では、将来的に設置される全ての SmartMeter に対して、遺伝的アルゴリズムを中心とする進化計算を適用して Gateway の配置数の最小化を図る。しかし、SmartMeter は徐々に配置されるため、時間的戦略が必要である。よって、第二目標として、第一目標で求められた Gateway の配置を用いて全ての SmartMeter が設置されていない状況での配置最小化を検討する。

本論文の構成は以下の通りである。

第 2 章で関連研究を述べる。第 3 章で将来的に設置される全ての SmartMeter に対する Gateway の配置最適化の手法及び全ての SmartMeter が設置されていない状況での Gateway の配置最適化手法を述べ、第 4 章で第 3 章で述べた手法による最適化の結果を述べる。考察は第 5 章では行い、結論を第 6 章で述べる。

2 関連研究

本章では配置問題における関連研究を述べる。

最適配置問題は様々な問題が解かれているが、しかし、配置最適化と一口で言うてしまうには異なる問題状況が多い [13]。

例えばテーマパーク内の施設配置最適化は、設置範囲の空間は限定されている、各施設の大きさは無視できる、施設の数設定してある、という条件の施設配置最適化である [1]。他にはボロノイ図を用いた配置最適化も多く研究されているが、これらは現在の設置箇所からさらに一つ施設を配置する時にどこに置くのが最適なのかという研究や、施設を複数設置する時各個数の場合においてどのような配置が最適なのかという研究であって、設置個数の最小化を目指したものではなく趣旨が異なる [2][3][4]。また、wifi などの無線 LAN アクセスポイントの配置についても多く研究されているが、アクセスポイントへのアクセスは電波が減衰しない限り行える上、障害物を考慮した上での配置問題であり、今回のように高所に設置されるため障害物を考慮しなくても良い問題とは別の問題となる [5]。今回扱うような、対障害性や障害物を考えることなく距離的制限、及び数的制限をうけながら最小数での配置を考える問題は見受けられなかった。

3 Gateway 配置最適化手法

本章では将来的に設置される 1598 機の Smart-Meter に対して遺伝的アルゴリズムによる最適化の手法と、SmartMeter の設置状況における Gateway の必要数と配置の最適化手法を述べる。第 3.1 章では最適化に必要な事前条件を述べ、第 3.2 章では今回使用した遺伝的アルゴリズムの手法について述べる。第 3.3 章では SmartMeter の設置状況における Gateway の最適化手法について述べる。

3.1 最適化の準備

Gateway は電柱に設置される。電柱は立地条件、住宅街、大通り沿いなどで変化するが、およそ 30~50m の間隔で設置されている。今回電柱が設置されている座標のデータは得られなかったため、考える範囲全域に一律に 50m 間隔で存在すると仮定した。50m 間隔で設置すると、16 万本の電柱が存在すると仮定される。

しかし、16 万の設置候補から高々数 10~100 を選ぶには候補が多すぎる。よって自明に使わない Gateway を除いて考える。自明に使わない Gateway とは以下の 2 条件のいずれかに該当する Gateway である。

- 接続できる SmartMeter の数が 0 である
- この Gateway が接続できる全ての SmartMeter に接続できる他の Gateway が存在する

2 つ目の条件は、SmartMeter 接続に関しての Gateway の包含関係が存在した時、包含関係の弱い方を使用しないことにするものである。これによって Gateway の候補場所を 4762 個まで減らすことができた。数 10~100 程度の設置場所を選択する候補場所が 16 万箇所から 4762 箇所まで 32 分の 1 に減ったことは最適化を行って行く上で有意に働くだらう。しかし、4762 の候補から数十を選択するにはまだまだ問題が大きく、最適解にたどり着くのは難しい。初めから 4762 個の候補から 100 個を選択する大きな問題を解こうとするから最適化が進まないの、数 10 個の候補から数個の Gateway を選択する問題にまで小さくしたい。

大きな問題を小さくする方法として領域分割法や分割統治法、動的計画法というものがある。領域分割法というのは偏微分方程式を反復法で解くものとして 1870 年に Schwarz H. A. によって定式化された解法であり、これは全体の領域を分割した時それぞれの小さな領域で方程式を解き、境界ではそれぞれの領域で求められた解を代入する方法である [19]。分割統治法はそのままでは解くのが難しい大きな問題をいくつかの小さな問題に分割し個別に解決して行くことで大きな問題を解決する手法であり、動的計画法は分割統治法によって求

められた小さな問題の結果を記録し、その記録を使いながら大きな問題を解く方法である。このように難しく大きな問題を複数に分割することで問題を小さくする方法は様々な分野でも用いられており、例えば、並列コンピューティングや遺伝的アルゴリズムでも用いられている [20][21]。今回の問題も全体で考えるから問題が大きくなってしまっているため、地図を格子状に区切り、分割された小さな各領域内に存在する SmartMeter と Gateway に対して最適化を図ることで問題を小さくする。各領域毎に局所最適解を大量に作っておき、領域ごとの Gateway の使用状況を繋げることで大局的最適解に近づけるのである。最小化開始時では細かく領域を作り各領域毎に最適化を行いながら、徐々に領域を広げていく。各領域毎に最適化を行うことで最適化を行っていくが、しかし、ここで求められた解はそれぞれの領域での最適解であって大局的最適解と一致していない可能性がある。

完全に領域ごとに分けて Gateway と SmartMeter を考えているので、よくない領域ができると最適化により悪個体が生成される可能性がある。ここでのよくない領域というのは、他の領域で使用することになっている Gateway の接続可能範囲に入っている SmartMeter がある領域に存在し、その領域の Gateway を余分に使用することにしないといけない場合である。このよくない領域は領域が細かくなればなるほどできやすい。しかし、問題を小さくするためには細かい領域から始めなければ局所的な最適解が出にくい。

対策として領域を動かすことが考えられている。よくない個体ができる原因である SmartMeter はその領域の端に存在する可能性が高いからだ。よくない領域が発生しても、領域を動かすことでよくない領域の原因となっている SmartMeter と Gateway を同じ領域にすることで最適化を図るのが目的である。

3.2 遺伝的アルゴリズム

今回、最適化の手法として遺伝的アルゴリズムを用いる [11]。

3.2.1 交叉法

遺伝的アルゴリズムの交叉法として様々な研究が行われているが、代表的なものとして一様交叉法と一点交叉法と二点交叉法がある [8][9][10]。

今回は二点交叉法を用いる。二点交叉なので遺伝子配列を2箇所まで切断し組み替えるので $2^3 = 8$ 個体の子が生成される。

遺伝的アルゴリズムにおいて多様性が重要であることはいうまでもない [8][6]。遺伝子を共通の n 箇所は今

回ランダムで決定したのだが、単純にランダムで決定すると、良い子個体が生まれない場合がある。ここでの良い子個体とは親個体と違う遺伝子を持つ子個体である。遺伝的アルゴリズムでは多様性が必要なので親個体と同じ遺伝子を持つ子個体が生まれても嬉しくはない。良い個体ができない状況というのは以下のような状況である。

1. 二点交叉法をとっているため、親の遺伝子は3つに分割される
2. 親1の3つに分割された遺伝子を $p1[0], p1[1], p1[2]$ とし、同様に親2の3つに分割された遺伝子を $p2[0], p2[1], p2[2]$ とする
3. $p1[0]$ と $p2[0], p1[1]$ と $p2[1], p1[2]$ と $p2[2]$ を比較した時、うち2つが一致すると生成される8つの子個体の遺伝子配列が全て親のものと同じになる

カエルの子がカエルでは多様性には嬉しくないものである。カエルの子には鷹にも茄子にもなってもらわなければいけない。このような状況を避けるために二点交叉の交叉方法を工夫することが考えられる [7]。しかし、一回一回分割した遺伝子同士を比較し、親個体と同じ遺伝子を持つ子しか生まれないと分かった時に、分割箇所を変えて分割した遺伝子同士を比較するのは手間も時間もかかる。よって他の子個体生成法として近傍法を考えた。次章で手法を述べる。

3.2.2 近傍法

巡回セールスマン問題における最適化手法の一つに2-opt法がある [15]。2-opt法を遺伝的アルゴリズムに取り込んだ手法も存在し、これは現在接続している点から近い点に経路を変えるものだ [12][14]。これを参考にし、ある程度最適化された個体に対する最適化方法として、現在使用することになっている任意の Gateway を一つ選び、選ばれた Gateway の近く(ここでいう近くというのは物理的距離)の Gateway を選ばれた Gateway の代わりに有効にした個体を生成し、それぞれを比較する方法を考えた。これを用いて新たに子を生成する

1. 親として選んだ個体で使用することになっている Gateway の数が n 個あったとする
2. 有効になっている各 Gateway に対して $1/n$ の確率で3~5の動作を行う
3. この Gateway を無効にする
4. この Gateway から1~5番目に近い Gateway から一つ選択する

5. ランダムで1~5番目に近い Gateway のうち一つを選び有効にする

確率が $1/n$ であるのは期待値を 1 とするためである。今回は、有効になっている Gateway から一つを選ぶのではなく、期待値を 1 とする確率で有効な Gateway から一つを選び、その Gateway と近い Gateway を入れ替えている。これは入れ替えられる Gateway が 1 つ以上でも大局的最適解に近づく可能性はあるためであり、また 0 であっても二点交叉法によっても子が生成されるためである。

3.2.3 突然変異

突然変異として各親の各遺伝子に対して一様に確率で設置不設置を入れ替えた。

3.2.4 重複削除

二点交叉法、近傍法、突然変異によって子が生成される。

二点交叉法によって 8 個体、近傍法によって 2 個体、突然変異によって 2 個体生成されるため、親 2 個体に対して子が 12 個体される。しかし、二点交叉法で生成される 8 個体の中には親と同一の遺伝子配列を持つ個体が少なくとも 2 個体存在し、また近傍法や突然変異についても場合によっては親の遺伝子配列と同一の遺伝子配列の子が生成される。

もしこの家族に複数存在する遺伝子配列が親子の中で優秀な (評価値の高い) 遺伝子であると、世代交代で残るのがこの遺伝子だけになってしまう。これは多様性を重視する遺伝的アルゴリズムでは問題である。よって、子の遺伝子配列が他の子個体の遺伝子配列と重複するものである、または、親と同一の遺伝子配列であるとき、その子を削除し、各遺伝子配列は親子の中で唯一のものにすることで多様性を確保する。

3.2.5 世代交代

世代交代方法については様々な研究がされてきた [7]。今回の問題は収束の速さより大局的最適解への近さを優先し、佐藤浩、小野功、小林重信によって提唱された Minimal Generation Gap 法 (MGG 法) を用いる [6]。

3.3 未来から現在への適用手法

第 3.1~3.2 章で述べた手法により将来的に配置される全ての SmartMeter に対する Gateway の適正配置が求まる。これを用いて、全ての SmartMeter が設置されていない場合の Gateway 必要数を取得する方法を述べ

る。

第 3.1~3.2 章の手法により求められる Gateway の配置は将来的に全ての SmartMeter が設置された時の配置である。現在から将来にかけて、全ての SmartMeter が設置されていない状態では、Gateway も全てが必要ではないことが考えられる。よって、SmartMeter 設置数が 1598 機の時を 100% とし、50%、25%、12.5%、6.25%、3.125% 分だけ SmartMeter が設置したときの Gateway の配置を考える。それぞれの場合の Gateway 配置は、SmartMeter を 100% 設置したときに選ばれた Gateway から選ぶ。Gateway の取り外し、取り付けにはそれぞれコストがかかるからである。また、SmartMeter は 1598 機の SmartMeter の緯度経度それぞれにおける平均と標準偏差から正規分布に基づく乱数を生成し、生成された乱数から一番近い位置にある SmartMeter を選択することをパーセンテージ分だけ行った。

各パーセンテージにおいて、第 3.2 章で述べた遺伝的アルゴリズムによる最適化を行う。各個体の遺伝子配列について、第 3.2 章で求められた Gateway N 個について、 i 番目の Gateway に対応する遺伝子を S_i としたとき、 i 番目の Gateway を設置する時 $S_i = 1$ 、設置しない時 $S_i = 0$ とし、各個体は Gateway の設置状況を $\vec{S} = (S_1, S_2, \dots, S_N) \in \{0, 1\}$ の N 次元ベクトルで表す。この遺伝子配列を持つ個体群について第 3.2 章で述べた遺伝的アルゴリズムを用いて最適化を行う。なお、第 3.1 章で述べた動的領域分割法は用いない。

4 結果

本章では第 3.1~3.2 章で述べた手法による将来的に設置される全ての SmartMeter に対する Gateway の配置の最小化の結果を第 4.1 章で述べ、第 3.3 章で述べた手法による SmartMeter がある程度設置された状況における Gateway の配置探索の結果を第 4.2 章で述べる。

4.1 全体最適化の結果

本章では第 3.1~3.2 章で述べた手法による最適化の結果を述べる。

本手法の適用によって未使用 SmartMeter 数 0 かつ、使用 Gateway 数を 62 個まで減らすことに成功した。

4.1.1 Gateway 数・未接続 SmartMeter 数の推移

第 4.1 章で示した評価値を構成する Gateway 数と未接続 SmartMeter 数の推移を図 2 に示す。

また、遺伝的アルゴリズムにおいて二点交叉、近傍、突然変異の 3 種類を用いて子を生成した。3 種類用いる妥

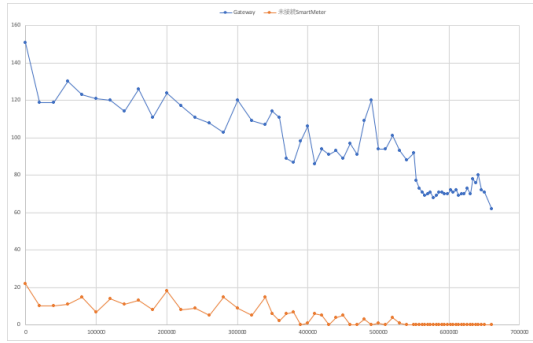


図 2: Gateway 数と未使用 SmartMeter

当性として, 近傍と突然変異を使った場合と使わなかった場合計 4 種類において最終世代における Gateway 数と未接続 SmartMeter 数を表 1 に示す. なお, Gateway を Gw, SmartMeter を SM と略している.

表 1: 近傍と突然変異による差異

近傍	突然変異	Gw 数	未接続 SM 数
あり	あり	62	0
あり	なし	70	24
なし	あり	65	0
なし	なし	76	10

今回, 動的領域分割法として, 領域を分割し, その領域を動かしながら最適化を行った. しかし, 領域を動かさずに分割するだけでは最適にはならないのかとも思う. よって, 領域を動かさずに分割だけをして最適化を行った結果を図 3 に示す. 結果として未接続 SmartMeter を 0, Gateway を 64 まで減らすことができた. これは分割をした場合より Gateway 数が 2 多い結果である.

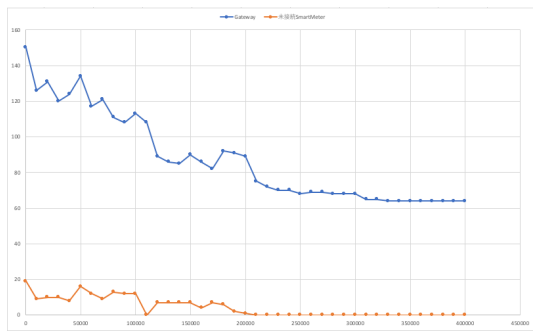


図 3: Gateway 数と未使用 SmartMeter の推移

4.1.2 厳密解との比較

小さな問題に対して, 厳密解と使用した進化計算アルゴリズムを用いて行なった結果を述べる.

簡単なものとして図 4 のように 1 点から接続可能距離内に SmartMeter を接続可能数配置し, それに対しての Gateway の配置を決定する問題が考えられる. この場合, 原点 ($x=0, y=0$) に一つ Gateway を配置すると全て SmartMeter と接続可能であり, これが厳密解となる.

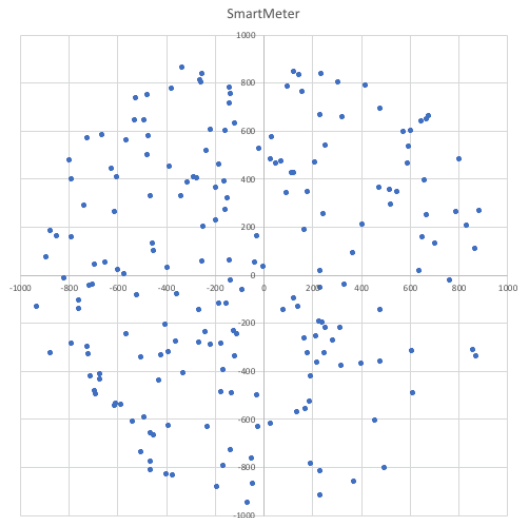


図 4: 199 機の SmartMeter

これに対して, 使用した進化計算アルゴリズムを適用した. Gateway の設置候補として, 原点を含む 1600 箇所が存在し, 重複を除いて 42 まで設置候補箇所が減少した. これに対して初期配置をランダムに 10% の確率で決定してから今回使用した進化計算アルゴリズムを適用した. 50 回ほど試行したが, いずれも 20 万世代まで更新し, 2 機までは Gateway の数を減らすことができた. 50 回の試行のうち, 2 機まで減らすのにかかった世代数を横軸に, その世代数までに 2 機まで減らせた試行回数を縦軸にとった棒グラフを図 5 に示す. 50 回中 36 回は 11 世代までに 2 機まで Gateway を減らすことに成功しており, 最も遅いもので 461 世代で 2 機まで減らしている. しかし, ここから 20 万世代まで更新しても 1 機まで減らすことができなかったことを考えるとこのアルゴリズムでは厳密解まで減らすのは難しい.

4.2 SmartMeter 削減時の結果

第 3.3 章で述べた手法による, SmartMeter が全て設置されていない時の Gateway の配置と必要数の結果を述べる.

各パーセンテージだけ SmartMeter が設置されたときの必要 Gateway の表を表 2 に示す. SmartMeter は正規分布に従う乱数によって選択されているので必要 Gateway 数はバラついている. 100% 以外では 1000 回の試行をした.

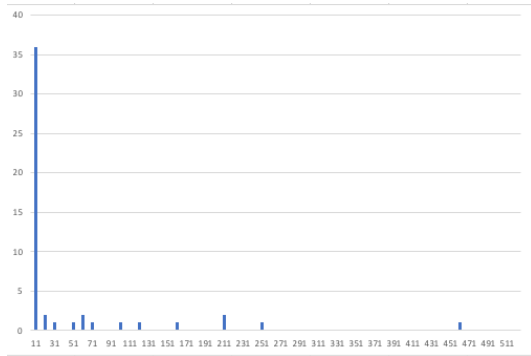


図 5: 世代数と回数

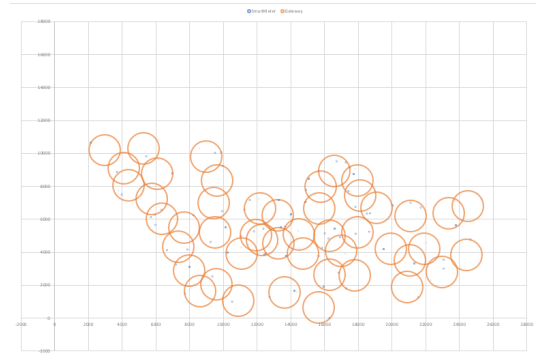


図 7: 6.25% 設置

表 2: SmartMeter の選択比率と必要 Gateway

		SmartMeter					
		3.125	6.25	12.5	25	50	100
Gateway	最小値	22	33	43	51	56	62
	最大値	38	49	58	59	61	62
	中央値	29	41	50	56	59	62
	平均値	29.3	40.9	50.3	55.8	58.8	62

箱ひげ図で表したものが図 6 である

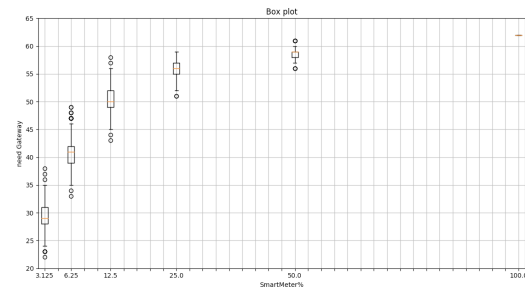


図 6: SmartMeter 選択比率と必要 Gateway 数

6.25% ,25% ,50% SmartMeter を設置した場合それぞれの 1000 回の試行のうちランダムに 1 回の試行の結果を抽出し, 抽出された結果における SmartMeter と Gateway の配置を Fig7~ 図 9 に示す. なお, 比較のために 100%設置された状況である図を図 10 に示す.

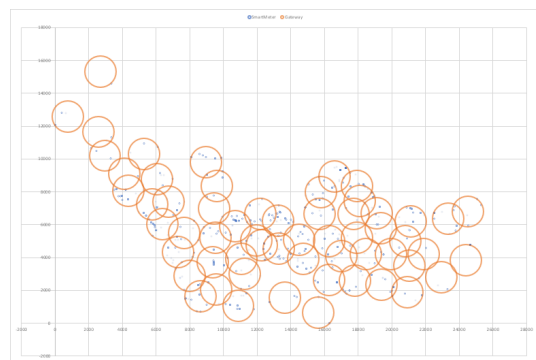


図 8: 25% 設置

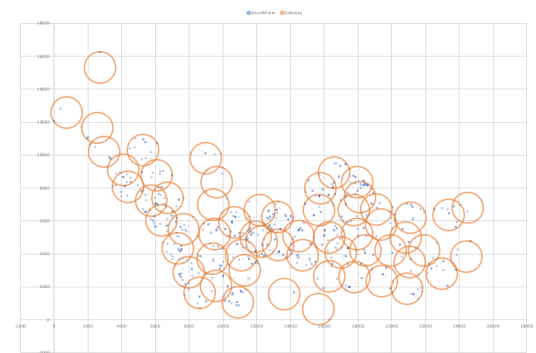


図 9: 50% 設置

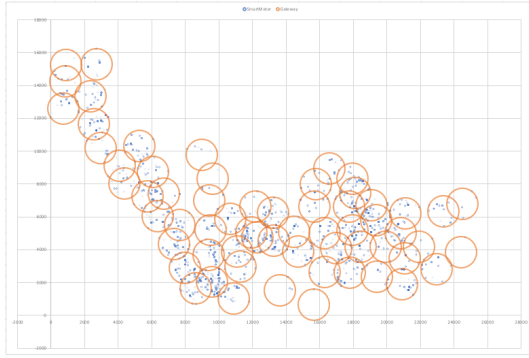


図 10: 100% 設置

5 考察

第 4.1 章で求められた将来的に設置される 1598 機全ての SmartMeter に対する Gateway の最適化についての考察を第 5.1 章で行う。第 4.2 章で求められた全ての SmartMeter が設置されていない状況での Gateway 配置についての考察を第 5.2 章で行う。

5.1 全ての SmartMeter に対しての最適配置について

第 4.1 章で求められた 1598 機全ての SmartMeter を使用した時の Gateway の配置最適化の結果についての考察を行う。

Fig??でわかるように評価値が世代を更新していく毎に一樣に減っていくわけではなく上下している。

第一世代はランダムで Gateway を配置しているので未接続 SmartMeter の数も Gateway の数も多く、評価値が高くなっている。そして、世代を更新していく上で配置が最適化されていき、評価値が低くなっていくことが予想されていた。しかしグラフを見ればわかるように常に評価値が下がる訳ではなく、時に大幅に上がっている。これは領域分割をして各領域ごとに配置を最適化しているからであると考えられる。個体を保存せずに、各領域毎に最適化を行なっているので、よくない領域ができたときは未接続 SmartMeter か使用 Gateway 数が増えている。しかし、未接続 SmartMeter が増えることと使用 Gateway 数が増えることの相関はない。

Gateway 数の推移と未接続 SmartMeter 数の推移に区間を幾つに分けていたかを追記したグラフを Fig11 に示す。このグラフから、領域分けをした状態で最適化を行ったあと領域を動かしながら世代を更新した時に、全体として良くなることも悪くなることもあることがわかる。しかし、図 3 により、領域を動かした方が最終的に大局的最適解に近くなることがわかるので、領域を動

かすべきである。よって、領域を動かしながら世代を更新する際には今までに生成された個体のうち最良個体を保存した状態で世代を更新することで全体として評価が悪くなることを防ぐ方法が考えられる。

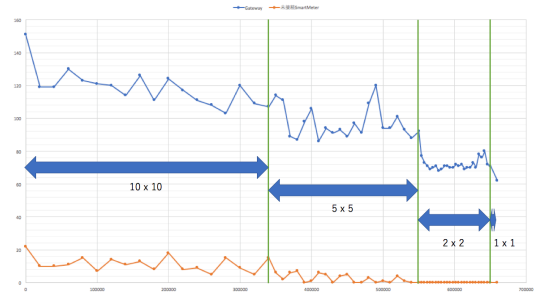


図 11: Gateway 数と未接続 SmartMeter 数の推移

5.2 全ての SmartMeter が配置されていない時の必要 Gateway について

第 4.2 章で求められた、全ての SmartMeter が設置されていない場合の必要 Gateway 数についての考察を述べる。

図 6 から、必要 Gateway の数が同じパーセンテージの中でも違うことが分かる。特に 3.125% SmartMeter を設置している状況において、必要 Gateway の数は大きく違う。これは SmartMeter が正規分布に基づく乱数により 1598 機から選択されるからであり、SmartMeter が広く分布するか狭く分布するかによって依存するからであると考察できる。また、必要 Gateway 数は SmartMeter が増えると共に対数的に増えているが、これは SmartMeter の空間充填率に必要 Gateway 数が比例するためだという考察ができる。よって、現在 SmartMeter が設置されている空間から大きく離れた空間に新たに SmartMeter が設置されない限りは SmartMeter が増えた時も Gateway を増やす必要は少ないことが考えられる。

6 結論

本論文では配電システムの SmartMeter/Gateway 配置問題に対して進化計算アルゴリズムを段階的に用いることで、時間的戦略が必要な問題に対して計算時間を多項式時間に抑えながらより良い Gateway の配置を決定した。

本手法の適用結果として、SmartMeter に対して Gateway を格子状に配置した既存手法より Gateway を約半数に減らすことに成功し、また、SmartMeter の増加に従って Gateway の必要数は対数的に増えることがわかり、計算時間を多項式時間に抑えることが可能であることを明らかにした。

残された課題として、今回は未来で Gateway の配置最適化を行い現在に向けて Gateway を減らすことで現在と未来での最適化を行ったが、現在の SmartMeter の配置から Gateway 最適化を行い、SmartMeter が増えていった時に Gateway がどのように増えるかを調べ、比較することがあげられる。また、今回は1つの Gateway の接続可能範囲を単位空間とした時に、単位空間内に Gateway の接続可能数を超える数の SmartMeter が存在しなかったため、距離制限のみを考えて Gateway を配置することで問題の解決ができた。しかし、高層ビルなどにより SmartMeter が密集した空間が存在した時に Gateway の配置がどのような配置になるかを考える必要がある。

参考文献

- [1] 大崎純：マルコフ連鎖モデルと遺伝的アルゴリズムによる施設最適化：本建築学会計画系論文集 第510号, 251/258, (1998)
- [2] 鈴木敦夫：最適配置問題をポロノイ図で考える：日本オペレーションズ・リサーチ学会 シンポジウム予稿集 (53回) (2005)
- [3] 石亀篤司：ポロノイ図を用いた電気自動車用急速充電器の適性配置：第4回 CHAdeMO 協議会 (2010)
- [4] 若林信夫：最適施設配置問題の社会情報学的考察：商学討究 46 1号 49/68 (1995)
- [5] 熊野英嗣, 三谷千恵, 舩曳信生, 中西透：無線 LAN の WDS におけるアクセスポイント配置アルゴリズムの提案情報処理学会 研究報告 104 554号 45/50 (2005)
- [6] 佐藤浩・小野功・小林重信：遺伝的アルゴリズムにおける世代交代モデルの提案と評価：人工知能学会誌 12 No.5 (1996)
- [7] 北野宏明：遺伝的アルゴリズム：人工知能学会誌 7 No.1 (1992)
- [8] 柳浦睦憲・茨城俊秀：遺伝アルゴリズムにおける交叉法に対する一考察：数理解析研究所講究録 871 190/196 (1994)
- [9] 喜多一・小野功・小林重信：実数値 GA のための正規分布交叉の多数の親を用いた拡張法の提案：計測自動制御学会論文集 36 No.10 875/883 (2000)
- [10] 樋口隆英・筒井茂義・山村雅幸：実数値 GA におけるシンプレクス交叉の提案：人工知能学会論文集 16 第1号 (2001)
- [11] Melanie Mitchell・Stephanie Forrest・John H.Holland：The Royal Road for Genetic Algorithms: Fitness Landscapes and GA Performance：MIT Press. (1992)
- [12] 前川景示, 玉置久, 喜多一, 西川緯一：遺伝アルゴリズムによる巡回セールスマン問題の一解法：計測自動制御学会論文集 31 No 5 598/605 (1995)
- [13] 青木善次, 村岡直人：遺伝的アルゴリズムを用いた地域施設配置手法：日本建築学会計画系論文集 484号 129/135 (1996)
- [14] 山村雅之, 小野貴久, 小林重信：形質の遺伝を重視した遺伝的アルゴリズムに基づく巡回セールスマン問題の解法：人工知能学会誌 7, No.6, 117/127, (1992)
- [15] G. A. Croes：A method for solving traveling salesman problems：Operations Res.6 791/812, (1958)
- [16] Christian Graul：leafletR: Interactive Web-Maps Based on the Leaflet JavaScript Library：R package version 0.4-0 ,(http://cran.r-project.org/package=leafletR) (2016)
- [17] R Core Team：R: A Language and Environment for Statistical Computing：R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria (https://www.R-project.org/) (2017)
- [18] OpenStreetMap contributors：Planet dump retrieved from https://planet.osm.org：(https://www.openstreetmap.org) (2017)
- [19] Schwarz H. A.：ber einen Grenzbergang durch alternierendes Verfahren：Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zrich 15 272/286 (1870)
- [20] Yagawa G., Soneda N., Yoshimura S.：A LARGE SCALE FINITE ELEMENT ANALYSIS USING DOMAIN DECOMPOSITION METHOD ON A PARALLEL COMPUTER：Computers & Structures 38 No.56 615/625 (1991)
- [21] 河村 圭・宮本文穂・中村秀明・佐藤 亮：対話的遺伝的アルゴリズムによるデジタル画像からのひび割れ抽出土木学会論文集 742 VI-60, 115/131 (2003)