

LoRaWANにおける熱力学的遺伝アルゴリズムにより 動的な環境変化に適応可能な拡散率割当手法

藤田 勇樹[†] 小南 大智[†] 下西 英之^{†,††} 村田 正幸[†]

[†] 大阪大学 大学院情報科学研究科 〒565-0879 大阪府吹田市山田丘 1-5

^{††} NEC システムプラットフォーム研究所 〒211-8666 神奈川県川崎市中原区下沼部 1753

E-mail: †{y-fujita,d-kominami,h-shimonishi,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし LPWA (Low Power Wide Area) は、主に IoT (Internet of Things) 向けのネットワークとして用いられている通信技術の総称で、その中でも開発の自由度が高い LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) は LPWA における主要な研究対象となっている。LoRaWAN ではネットワークの状況に応じて、動的に端末のデータレートや送信電力を変更することが可能であるが、多数の端末の個々の状態を即時に把握して最適な状態を計算し、端末に割り当てることは、LoRaWAN の通信速度の低さから非常に困難となる。本稿ではネットワーク状況が変動する環境においても、スループットの向上と省電力化を同時に実現する、生物の進化の仕組みに着想を得た拡散率の割当手法を提案する。提案手法を用いることで、パケット到達率と消費電力の2つの指標についての最適化が、変動する環境においても実現可能であることを示す。

キーワード 生物の進化、多様性、TDGA, GA, LPWA, 多目的最適化

An adaptive spreading factor allocation method to dynamic environmental changes using Thermodynamical genetic algorithm for LoRaWAN

Yuki FUJITA[†], Daichi KOMINAMI[†], Hideyuki SHIMONISHI^{†,††}, and Masayuki MURATA[†]

[†] Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

^{††} System Platform Research Labs, NEC Corporation

E-mail: †{y-fujita,d-kominami,h-shimonishi,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

Abstract Low Power Wide Area (LPWA) is a novel communication technology for realizing Internet of Things (IoT) networks, and Long Range Wide Area Network (LoRaWAN) is a major research target in LPWA. LoRaWAN is capable of dynamically changing the data rate and transmission power of nodes in order to improve the packet delivery rate and achieve energy saving. However due to the low transmission speed of LoRaWAN, it is difficult to grasp the network condition by collecting information from each node, calculate the optimal data rate and assign it to each node. In this paper, we propose a spreading factor allocation method inspired by the evolutionary mechanism of living organisms that simultaneously improves packet delivery rate and energy saving even in a fluctuating network environment. Through a computer simulation, we show that optimization of such two metrics can be achieved even in a fluctuating environment.

Key words Evolution of living things, diversity, TDGA, GA, LPWA, Multi-objective optimization

1. はじめに

LPWA (Low Power Wide Area) は、低消費電力かつ長距離通信可能な無線通信技術の総称であり、IoT (Internet of Things) の構成要素として、欧州などで既に広く用いられてい

る [1]。LPWA の通信速度は一般に数 100 bps–数 10 kbps 程度と低速だが、Bluetooth や ZigBee 以上の電力効率と、3G や LTE 以上の通信距離を実現する。LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) は LPWA に属する通信ネットワークの一つであり、LoRa 変調を使用する端末およびゲートウェイで構

成される広域ネットワークである [2]。LPWA には LoRaWAN 以外にも Sigfox, NB-IoT 等の規格が存在するが、LoRaWAN は他の LPWA よりも実装の自由度が高く、使用者が独自に運用する自営網を構築できることから、IoT ネットワークの主要な研究対象となっている [3]。

LoRa はアンライセンスバンドを用いており、通信モジュールも容易に入手できるため、ユーザが自由に自営網を構築することができる。このため、将来的には多数の LoRa 端末によって構築される複数の自営網が同一エリアに混在する状況が考えられる。LoRa による通信は一般にデータレートが低く、そのため端末のデータ伝送時間が長い。また、MAC 層には ALOHA プロトコルを採用しており、端末数の増加とともにデータパケットの衝突増加が懸念される。LoRa のチップにはキャリアセンス機能が搭載されているものの、LoRa のアンテナ受信感度は高く、例えば IEEE 802.11 で使用されている -80dB 程度の CCA (Clear Channel Assessment) しきい値を用いると、しきい値よりも低い信号強度の電波であってもゲートウェイまで信号が到達する可能性が十分にある。この場合、結果的に ALOHA を利用している場合と同様に衝突が生じることが予想される。一方でしきい値を下げると、LoRa の通信範囲が非常に広いために、端末はより多くの端末からの無線通信にさらされ、無線チャネルがビジー状態と判定される可能性が非常に高くなる。

現在の LoRa の通信規格では、ネットワークの大規模化やネットワークの混在によって生じる干渉の影響を考慮して、端末の利用できるデータレートが複数用意されている。LoRaWAN ではゲートウェイによるデータレートの動的な制御 (adaptive data rate; ADR) が可能となっており、ゲートウェイからの制御信号により端末の拡散率 (Spreading Factor; SF) を変えることでデータレートの変更が実現される [4]。一般に拡散率が大きいほどデータレートは低下し、伝送時間が増加するため消費電力が増大する一方で、信号対雑音比 (SN 比) が大きくなり、受信感度と通信可能距離が増加する。また、同一の周波数帯であっても拡散率の異なる電波信号同士は、LoRa ゲートウェイで同時に受信が可能である [5]。

LoRaWAN の先行研究では、カバレッジやスケラビリティに関する性能が示されていた [6], [7]。また近年では、データレート制御によるスループット向上や長寿命化に関する検討が行われている [8]。LoRaWAN の元々の仕様では ADR はゲートウェイによって行われる [4] が、ゲートウェイがスループットを最大化するように個々の端末のデータレートを決定する問題は、組合せ最適化問題であり、現実的な時間内での最適解の探索が困難である。全ての端末から十分な時間をかけて情報を集め、最適化問題を解くような方法を採用すると、この間の性能劣化が避けられない可能性がある。

一般に、さまざまな環境変動によって無線の混雑度合いや通信品質は変動する。本稿では、変動に適応可能な、LoRaWAN における ADR の実現のために、様々な環境変動下で生存してきた生物の進化の仕組みに着目する。具体的には、進化アルゴリズムの一つである遺伝的アルゴリズム (GA) に対して、個体

の多様性を備える仕組みを追加することで、動的な環境への適応性を実現した、熱力学的 GA を、LoRaWAN における拡散率割当の決定に用いる [9]~[11]。熱力学的 GA は、交叉や突然変異といった遺伝的操作は従来同様であるが、個体群から次世代に残す個体を選択する際に、個体ごとの適応度だけでなく個体群の多様性を考慮する。温度パラメータを低く設定する際には適応度が重視され、高く設定する際には多様性が重視される。本稿では端末の移動を考慮した LoRaWAN アプリケーションを想定し、計算機シミュレーションによって TDGA の性能を明らかにする。特に、動的に混雑度合いが変化する場合において、通常の GA であれば発見が困難な状況下であっても、TDGA が高速により良い解を発見できることを示す。

2. 熱力学的 GA

本節では文献 [9] で提案された熱力学的 GA を説明する。

温度 T で熱平衡しているシステムの状態は、自由エネルギー

$$F = \langle E \rangle - TH \quad (1)$$

を最小にする確率分布であることが知られている (自由エネルギー最小化原理)。ここで、 $\langle E \rangle$ はシステムの平均内部エネルギーであり、 H はエントロピーである。自由エネルギーが最小化される時、式 (1) の右辺は、 $\langle E \rangle$ がエネルギー最小化を目的とし、 $-H$ が状態の多様性を追求する項であると解釈でき、 T はこの 2 つを調和させるパラメータとして扱われる。このように自由エネルギー F を最小化するような $\langle E \rangle$ と H を導出する仕組みを GA に適用したものが TDGA である。TDGA では、対象とする問題の解空間において、適合度の高い個体を残しながらも、交叉や突然変異で生じた個体の中で他の個体と異なる度合いが大きいものを積極的に次世代に残す。このことが、目的関数の変動後に新たな解を発見する際に有効に機能することが期待できる。

具体的な TDGA の動作は以下の通りである。あらかじめ、個体数 N 、最大世代数 G 、温度スケジュール関数 $T(t)$ を決めておく。

(0) 世代数 $t = 0$ とする。個体群 $P(0)$ をランダムな個体で初期化する。

(1) 適合度 (fitness) が最大であるエリート個体を e とする。

(2) $P(t)$ から交叉を行い N 体の子を生成する。

(3) 次世代の候補群 $P'(t)$ を $P(t)$ と 2. で生成した子で構築し、 $P'(t)$ に突然変異を行う。

(4) 次世代の個体群 $P(t+1)$ に e を加える。

(5) 次世代の個体として選択した個体数 $i = 1$ とする。

(6) $P'(t)$ から 1 体個体を選んで次世代の個体群 $P(t+1)$ に移動する。この際、 i 番目に $P'(t)$ から個体 h を $P(t+1)$ に加えると仮定したとき、 $P(t+1)$ 自由エネルギー F ((2) 式) が最小になる h からランダムに 1 体選び i 番目に加える個体とする。

(7) $i = i + 1$ とし、 $i < N$ なら 6. に戻る。

(8) $t = t + 1$ とし、 $t < G$ なら 1. に戻る。

$$F = \langle E \rangle - T(t)H$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^i E_i(P(t+1))}{i} - T(t)H \quad (2)$$

式 (2) において、TDGA ではシステムの平均エネルギー $\langle E \rangle$ を各個体の fitness の平均を負にした値で表す。

系の多様性を表すエントロピー H の最も単純なものとして、すべての遺伝子座を一括して扱った H^{ALL} があげられる。

$$H^{ALL} = - \sum_i p_x \log p_x \quad (3)$$

ここで p_x は個体群中での種 x の存在確率である。しかし GA では個体群のサイズは種の総数に比べ非常に小さいため、個体群がわずかに異なる個体から構成されていても、 H^{ALL} は大きな値となってしまう実用的ではない [9]。そこで TDGA では遺伝子座ごとのエントロピー H^1 や隣接する 2 つの遺伝子座ごとのエントロピー H^2 [10] を用いている。

本稿では H^1 を採用する。エントロピー H^1 は以下の式 (4) で定義される。

$$H^1 = \sum_{k=1}^M H_k^1, \quad H_k^1 = - \sum_{\alpha \in \text{allele}} P_\alpha^k \log P_\alpha^k \quad (4)$$

式 (4) において、 H_k^1 は個体群の遺伝子座 (遺伝子の位置) k の遺伝子についてのエントロピーを表し、 P_α^k は遺伝子座 k における対立遺伝子 α の存在確率である。

3. 提案手法

3.1 LoRaWAN モデル

複数台のゲートウェイに対して複数の移動可能な LoRa 端末がデータを送信する状況を想定する。このような状況としては、例えば見守りサービスアプリケーションが考えられる。LoRa 端末では定期的にデータが発生し、発生直後にゲートウェイへの送信を行う。LoRa 端末から基地局へのデータ送信は ALOHA プロトコルにより行われる。データ発生後の送信は一度のみ行われ、再送は行わない。端末の送信するデータは少なくとも一つの基地局において正常に受信、復号されれば、到達に成功したとみなす。

それぞれの端末が使用する帯域幅は同一のものとする。ある基地局において複数の信号が同時に到達した場合、それらが同じ拡散率を使用している場合両信号の復号に失敗するが、異なる拡散率を使用している場合は両信号ともに復号に成功する。ただし、LoRa 端末と基地局との距離に応じて信号強度の減衰が生じることとし、それにより確率的に復号エラーが発生し、復号に失敗する場合も想定する。

LoRa 端末の使用する拡散率は基地局からの制御情報の送信により変更されるが、端末一つ一つに対してこのような送信を行うことは、通信速度の遅い LPWA において非常にオーバーヘッドが大きい。そこで、観測対象のエリアを複数のサブエリアに分割し、同一のサブエリアに所属する LoRa 端末は同じ拡散率

を使用することとする。基地局からの制御情報の送信は、各サブエリアに対してブロードキャストにより一括で行われる。このとき、各 LoRa 端末は自身がどのサブエリアに現在所属するのを知る必要があるが、位置情報については GPS により取得可能であることを仮定する。また、サブエリアの大きさに対して GPS の位置推定誤差が非常に小さいため、各 LoRa 端末は自身が所属するサブエリアについて正確な情報を常時知ることができることを仮定する。

3.2 個体表現

個体中の遺伝子数は LoRaWAN におけるサブエリアの個数と同一とし、各遺伝子座 (遺伝子の位置) とサブエリアの拡散率が図 3.2 のように対応する。そのため、各遺伝子座は SF7 から SF12 に対応する値となる。

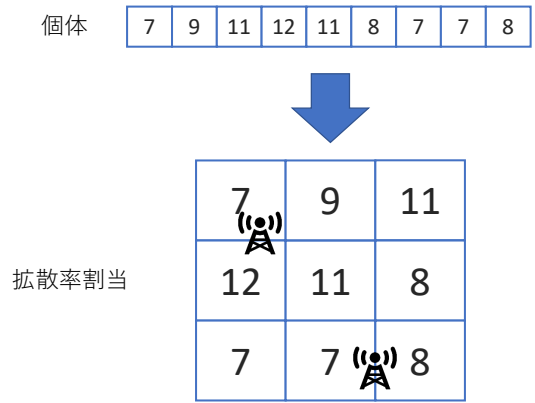


図 1 遺伝子と拡散率制御の結びつけ

3.3 適合度関数

前節に示した LoRaWAN モデルにおいて、可能な限りデータの到達率の向上と、消費電力の抑制を実現することが本稿での目的となる。このときの厳密解は、選択可能な拡散率の数を N_{SF} 、サブエリア数を N_{area} とすると、 $N_{SF}^{N_{area}}$ に比例する回数探索が必要となる。例えば LoRa が使用可能な六つの拡散率を、100 のサブエリアに割り当てる場合、 $6^{100} \simeq 6.5 \times 10^{78}$ 回の探索が必要である。本稿ではこの問題に対して TDGA による解の探索を行う。

本稿では、適合度として以降で説明する F_{arr} と F_{pow} の和を用いる。

ALOHA システムにおいて、同一リンク上に n 台の端末が存在し、1 台の端末から単位時間あたり平均 p 個のパケットが発生することを考える。このとき、全端末からのパケット発生率 μ は np に等しい。よって、単位時間中に x 個のパケットが発生する確率 $P(x)$ は式 (5) のポアソン分布で表される。

$$P(x) = \frac{\mu^x}{x!} e^{-\mu} \quad (5)$$

1 個のパケットの送信時間を T とすると、時刻 0 に発生したパケットが衝突せずに送信されるためには、時刻 $-T$ から T の間に他のパケットが発生していなければよく、この確率 P_{ALOHA} は、

$$P_{ALPHA} = P(0)^2 = e^{-2\mu T} \quad (6)$$

である。

a) 単一基地局での到達率を考慮した適合度関数

LoRaWAN 通信システムでは、端末ごとに使用する拡散率が異なる。前述の通り、異なる拡散率を使用する端末同士の通信は衝突しない。また、送信経路中のパケットエラー率は拡散率ごとに異なる。送信経路中のパケットエラー率を PER とするとき、LoRaWAN における端末のデータ到達率 F_{arr} は、

$$F_{arr} = (1 - PER)e^{-2\mu T} \quad (7)$$

である。ただし、適合度関数を計算するにあたり、端末はすべて自身の所属するサブエリアの中心に位置することとして、 PER を計算する。また、 n は同じ拡散率を用いる端末数の総和であり、 p はパケット発生周期の逆数である。

端末ごとに F_{arr} を求め、その平均値を到達率に関する適合度とする。

b) 複数基地局での到達率を考慮した適合度関数

LoRaWAN では複数の基地局を使用することが可能である。その際は、ある端末の通信範囲に複数の基地局が存在することが想定される。本稿ではある端末 m の通信範囲には全ての基地局が含まれることを仮定し、各基地局を BS_i とするとき ($i = 0 \dots N_{BS} - 1$, N_{BS} は全基地局数)、LoRaWAN の仕様上、端末が送信したデータは少なくとも一つの基地局で正常に受信されればよい。そのため到達率 (F_{arr}) は以下のようになる。

$$F_{arr} = N_{all}^{-1} \sum_{m=0}^{N_{all}} \left\{ \prod_{i=1}^{N_{BS}} (1 - PER(m, i))(1 - e^{-2\mu T}) \right\} \quad (8)$$

ここで、 $PER(m, i)$ は端末 m と基地局 i との距離に応じて定まるパケットエラー率、 N_{all} は全端末数である。

c) 消費電力を考慮した適合度関数

消費電力の適合度関数として式 (9) を用いる。ここで n は制御対象の端末数、 $Pow(SF)$ は拡散率 SF での 1 回のデータ送信に要する消費電力とし、 P は端末すべてについての 1 回のデータ送信に要する消費電力の総和である。拡散率が最大の 12 と最小の 7 の場合についての消費電力を用い、 F_{pow} を 0 から 1 の範囲に収めている。

$$F_{pow} = -\frac{P - nPow(12)}{n(Pow(12) - Pow(7))} \quad (9)$$

4. 性能評価

本節では計算機シミュレーションを用いて提案手法の性能を評価する。

4.1 比較手法

比較対象となる手法として、単純な遺伝的アルゴリズム (SGA) を用いる。SGA は以下のステップで実行する。個体群のサイズを N とし、繰り返し回数を G とする。また個体群の中で評価値のよい個体をエリートとして残しておくエリート戦略をと

り、保存するエリート数を N_{elite} とする。

(0) 現世代の集合と次世代の集合をそれぞれ用意し、現世代の N 個体をランダムに生成する。

(1) 現世代の集合からランダムに選んだ 2 個体を一様交叉させ、次世代の集合に加える。

(2) 1. を繰り返し、計 N 体の個体を次世代の集合に加える。

(3) 現世代の集合の各個体のコピーを次世代の集合に加える。

(4) 現世代の集合のうち、評価値が上位 N_{elite} 体であるものを残し他は削除する。

(5) 次世代の集合の各個体に対し一定確率で突然変異を行う。

(6) 次世代の集合から $N - N_{elite}$ 体の個体を選択し現世代に追加する。

(7) 1. に戻る。G 回繰り返していれば次世代の集合から評価関数を最大にする個体を出し終了する。

各ステップ中に登場する遺伝的操作は以下の通りである。選択の手法以外は、TDGA でも同じものを用いる。

交叉 交叉は生物の交配に対応し、親である 2 体の個体のゲノムを用いて新たな子を 2 体生成する。本稿では一様交叉と呼ばれる交叉手法を用いる。一様交叉では、親の各遺伝子に対し、もう一体の親と一定確率で同じ遺伝子座の遺伝子と入れ替え、これら 2 つのゲノムを子とする。

突然変異 突然変異は生物の遺伝子の突然変異に対応する。本稿では、各遺伝子に対し、一定の変異確率で現在の値と異なる拡散率に変化させる。

選択 選択は生物の自然淘汰に対応し、評価関数をもとに各個体の適応度を求め、適応度が高いほど選択されやすい手法を用い、環境に適した個体を次世代に残す。本稿では選択の手法としてルーレット選択を用いる。ルーレット選択では、世代 P の各個体 i が選択される確率 p_i を式 (10) で定め、この確率で合計 N 個体を選択する。

$$p_i = \frac{f(i)}{\sum_{k \in P} f(k)} \quad (10)$$

ただし、 f は 3.3 で定める適合度関数である。

4.2 シミュレーション設定

シミュレーション環境として、5 台の基地局をランダムな位置に配置し、端末からのデータがどれか一つの基地局に届けば受信成功という LoRaWAN を想定した。各 LoRa 端末では定期的にデータが発生し、位置情報とともに発生直後に基地局への送信を行う。データ送信には ALOHA プロトコルにより行われ、再送は行わないこととした。

基地局は端末位置情報をもとに、各サブエリアに所属する端末の数を求め、TDGA または SGA で各サブエリアに所属する端末に割り当てる拡散率を決定する。割り当て方を決めた後に、サブエリアごとに制御信号をブロードキャストにより送信し、メッセージを受け取った端末は自身の拡散率を変更する。SGA および TDGA のパラメータを表 1 に、その他のシミュ

レーションパラメータを表 2 に示す。

シミュレーションでは 15km 四方のエリアに端末を 6000 台ランダムな位置に設置する。この端末は移動を行わない。エリアは 10×10 のサブエリアに分割し、同じエリアに含まれる端末は同じ拡散率が割り当てられる。シミュレーション中の環境変動として、以下に記載するように端末の追加と端末の移動が生じる。

- シミュレーション開始時に、ランダムに選んだサブエリア 20 個のそれぞれに端末 200 台が追加される。
- 以降 2500 秒が経過するごとにこれらの追加された端末は別のサブエリアに移動する。このとき、同じサブエリアに存在する 200 台の移動する先は同一とする。

スループットの fitness として、式 (7) によって計算したスループットの平均値を使用する。消費電力の fitness として式 (9) を用いる。評価関数を、これら 2 つの fitness の合計値とする。また、消費電力にはペナルティを設定し、全端末の合計消費電力が上限値を超えると電力項の fitness を $1/100$ にする。

表 1 GA のパラメータ

パラメータ	設定値
個体群サイズ	500
呼び出しごとに計算する世代数	100
突然変異率	0.05
交叉率	0.3

表 2 シミュレーション設定

パラメータ	設定値
シミュレーション時間	10000 秒
端末台数	10000 台
GA 呼び出し周期	50 秒
GA 呼び出し開始時間	100 秒
電力上限値	792 mW

4.2.1 パラメータ設定

設定したパラメータのうち、LoRa に関するものを表 3 に示す。

表 3 LoRa に関するパラメータ

パラメータ名	設定値	説明
FIELD.WIDTH	15 km	制御対象エリアの横幅
FIELD.HEIGHT	15 km	制御対象エリアの縦幅
AREA_DIV_X	10	エリアの横区切り数
AREA_DIV_Y	10	エリアの縦区切り数
DATA_RATE	100 秒	データ発生周期

また、端末-ゲートウェイ間の距離と拡散率によって、ゲートウェイに届く信号に誤りが生じる確率が変化する。本稿では表 4 に示すパケットエラー率の値を用いてシミュレーションを行う。

4.3 評価結果

TDGA では温度パラメータ T を変えながら、SGA ではエ

表 4 使用可能な拡散率とパケットエラー率

距離\拡散率	7	8	9	10	11	12
0-1km	0%	0%	0%	0%	0%	0%
1-2km	20%	10%	0%	0%	0%	0%
2-3km	40%	30%	15%	15%	10%	10%
3-4km	50%	40%	30%	25%	20%	15%
4-5km	60%	55%	45%	30%	25%	20%
5km-	80%	70%	60%	50%	40%	35%

リート数 N_{elite} を変えながら一つのパラメータごとに 10 回シミュレーションを行った。すべてのシミュレーションで制御対象の環境である端末の配置と移動先および基地局の配置は同一である。TDGA および SGA は 50 秒ごとに実行され、もっとも fitness の値が高い個体が解として出力される。TDGA および SGA の結果として得られる fitness の分布を箱ひげ図によって表したものを、図 4.3 および、図 4.3 に示す。また図 4.3 では、TDGA の温度パラメータを変えて、1 回のシミュレーションでの fitness の推移を示す。

$T = 10^{-4}$ では常に電力の上限値を超えない解が得られているが、それ以外の T の値では電力の上限を超えてしまい fitness の低い解を出力する場合があることが分かる。すなわち、温度パラメータが低すぎても高すぎても fitness の高い解を高速に発見することができない。

図 4.3 を見ると、 $T = 0$ では時刻 4700 までは、電力の上限値を超える解が得られており、それ以降は上限値を超えない解が得られている。 $T = 10^3$ ではシミュレーション開始直後と一度目の環境変動の直後以外は電力の上限値を超えないような解が得られている。 $T = 10^{-2}$ ではほぼすべての時刻で電力の上限値を超えてしまっている。

$T = 10^{-4}$ では内部エネルギーの最小化により、fitness の高い個体を残しつつも、比較的高い多様性を維持するように進化することで、高い解発見能力が得られている。 $T = 10^{-3}$ や $T = 10^{-2}$ ではエントロピーが非常に高い値をとっており、 $T = 10^{-4}$ のときと比較して、fitness の高い個体が進化の際に残りづらいことを確認している。これにより、電力上限を超えない解をすばやく発見できていない。

$T = 0$ に設定すると、式 (2) でのエントロピーを無視することになり、単純に fitness の高い順に次世代の個体を選択する。このため解空間を広く探索することができず、電力の制限を満たす解の発見が遅くなる。

また SGA では、エリート数をどのように設定しても、電力制限を満たす解が発見できていない時刻が生じており、SGA と比較して TDGA が有効であることが確認できた。

以上のことから、TDGA を用い適切に温度パラメータ T を設定することで、変動する環境においてもパケット到達率と消費電力についての最適化をすばやく行えることがわかった。

5. おわりに

本稿では、LoRaWAN について、パケット到達率を高めながらシステム全体の消費電力が一定値を超えないよう拡散率の

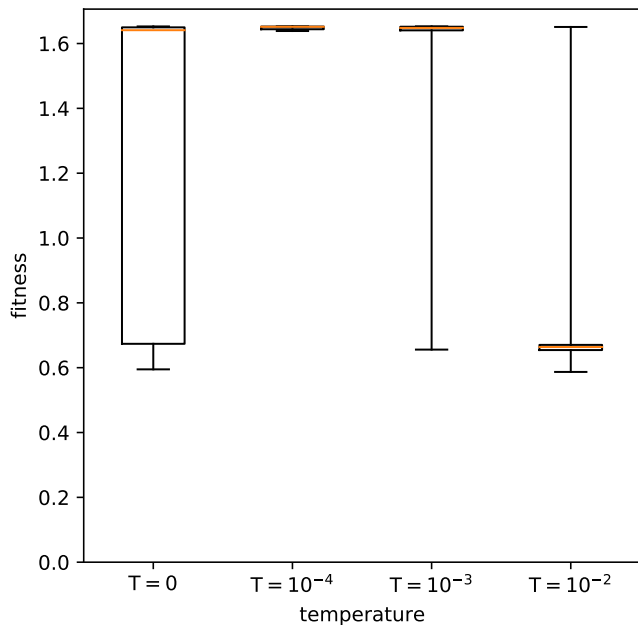


図2 TDGAでのfitnessの比較

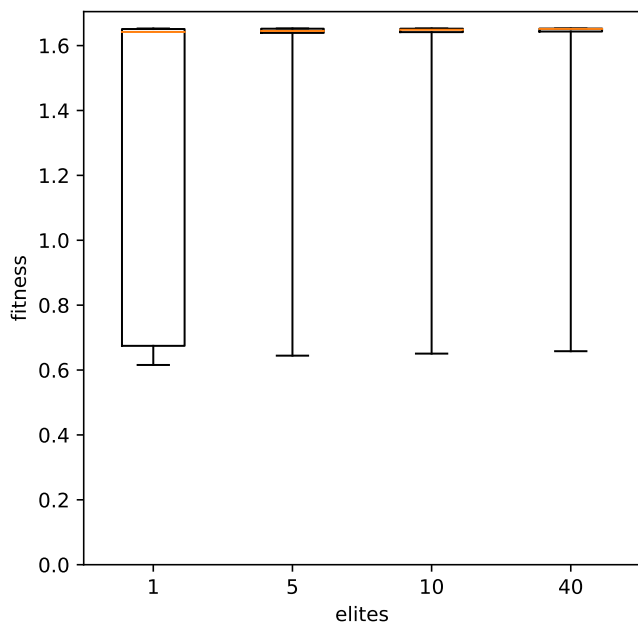


図3 SGAでのfitnessの比較

割当制御を、動的に変動する環境に対して行う手法を提案し、評価を行った。TDGAの温度パラメータを適切に設定することで、消費電力の制限を常に満たしながらパケット到達率を高める制御が行えることが示せた。本稿では、温度パラメータは手作業で変更しながら性能が良くなる値を探している。このため、適切な温度パラメータを効率よく、または自動的に発見する方法の提案が今後の課題である。

謝 辞

本研究の一部は JSPS 科研費 21K11845 の助成を受けたもの

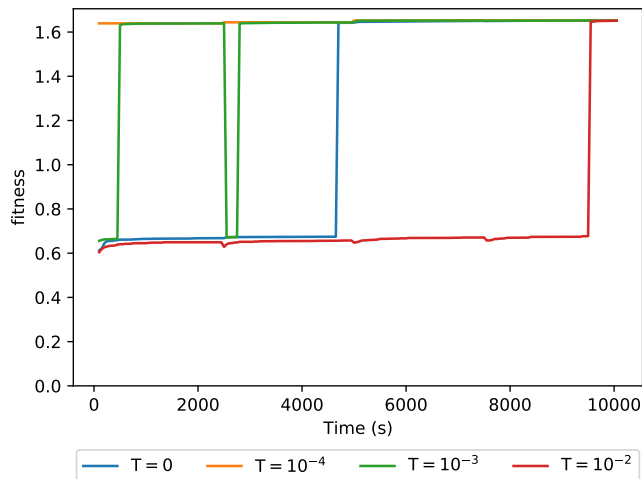


図4 TDGAでのfitnessの推移

である。

文 献

- [1] R.S. Sinha, Y. Wei, and S.-H. Hwang, "A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT," *ICT Express*, vol.3, no.1, pp.14–21, March 2017.
- [2] LoRa Alliance, "LoRaWAN what is it? A technical overview of LoRa and LoRaWAN". <https://loralliance.org/sites/default/files/2018-04/what-is-lorawan.pdf>
- [3] M. Saari, A.M. bin Baharudin, P. Sillberg, S. Hyrynsalmi, and W. Yan, "LoRa – A survey of recent research trends," *Proceedings of 2018 41st International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*, pp.872–877, May 2018.
- [4] LoRa Alliance, "LoRaWAN specification (v1.1)". https://loralliance.org/sites/default/files/2018-04/lorawantm_specification_v1.1.pdf
- [5] M. Bor, J. Vidler, and U. Roedig, "LoRa for the internet of things," *Proceedings of the 2016 International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks*, pp.361–366, EWSN '16, Junction Publishing, Feb. 2016.
- [6] J. Petajajarvi, K. Mikhaylov, A. Roivainen, T. Hanninen, and M. Pettissalo, "On the coverage of LPWANs: range evaluation and channel attenuation model for LoRa technology," *Proceedings of 2015 14th International Conference on ITS Telecommunications (ITST)*, pp.55–59, Dec. 2015.
- [7] M.C. Bor, U. Roedig, T. Voigt, and J.M. Alonso, "Do LoRa low-power wide-area networks scale?," *Proceedings of the 19th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, pp.59–67, Association for Computing Machinery, Nov. 2016.
- [8] R. Kufakunesu, G.P. Hancke, and A.M. Abu-Mahfouz, "A survey on adaptive data rate optimization in LoRaWAN: Recent solutions and major challenges," *Sensors*, vol.20, no.18, pp.1–25, Sept. 2020.
- [9] 森直樹, 吉田潤二, 喜多一, 西川よし一, "遺伝アルゴリズムにおける熱力学的選択ルールの提案," *システム制御情報学会論文誌*, vol.9, no.2, pp.82–90, Feb. 1996.
- [10] 森直樹, 数本靖之, 喜多一, 西川よし一, "熱力学的遺伝アルゴリズムによる多目的最適化," *システム制御情報学会論文誌*, vol.11, no.3, pp.103–111, March 1998.
- [11] 森直樹, 喜多一, 西川よし一, "熱力学的遺伝アルゴリズムによる動的環境への適応," *システム制御情報学会論文誌*, vol.12, no.4, pp.240–249, April 1999.