

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

大阪大学大学院 情報科学研究科
情報ネットワーク学専攻 村田研究室
藤田 勇樹

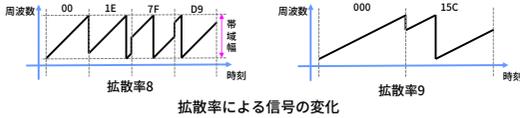
LoRaWAN

- 低消費電力/長距離通信可能な IoT 向け広域ネットワーク規格
 - 数百 bps – 数十 kbps 程度の低い通信速度
 - Bluetooth や ZigBee 以上の電力効率
 - 3G や LTE を超える通信距離
 - 端末→ゲートウェイの上り通信が中心
- 端末数が増加すると通信の衝突が頻発
 - MAC プロトコルに ALOHA を使用することに起因
 - 端末ごとに拡散率 (後述) を動的に制御し衝突の緩和が可能

2

拡散率

- 情報を時間的に広げる度合い
 - 異なる拡散率での通信は周波数の変化周期が異なるため干渉に強い
 - 周波数が重なり干渉する時間が非常になくなるため



拡散率設定のトレードオフ

拡散率	通信速度	衝突率	通信可能距離	ノイズ耐性	消費電力
小	高	低	短	低	小
大	低	高	長	高	大

3

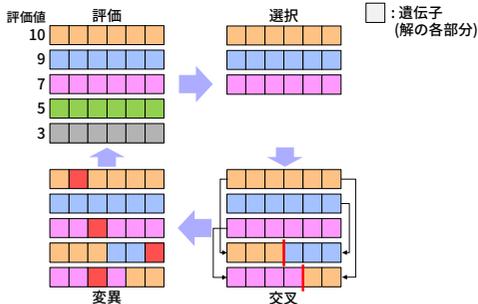
研究目的とアプローチ

- LoRaWAN 制御における課題
 - 適切な拡散率割り当ての決定は組み合わせ最適化問題
 - 端末数の増加とともに現実的な時間での導出が困難
 - 端末の移動等の環境変動に対する動的な制御の遂行が困難
- 研究目的
 - 環境変動に対応する LoRaWAN への拡散率制御の実施
- アプローチ
 - 熱力学的遺伝アルゴリズムを利用
 - 個体群の多様性を維持し、環境へのすばやい適応力をもつ手法

4

(通常の) 遺伝的アルゴリズム

- 生物の進化のしくみで最適化問題を解くアルゴリズム
 - 選択・交叉・変異の3要素



5

熱力学的遺伝アルゴリズム (TDGA)^[4]

- 個体群の多様性を維持し、動的な環境への適応・最適化が可能な遺伝的アルゴリズム
- 選択の操作で多様性を維持する仕組み (後述) を取り入れ多様性を維持
- 通常の遺伝的アルゴリズムでは、世代を重ねるにつれ個体群の多様性が失われる
 - 初期収束の問題が発生

[4] 森原樹, 喜多一, 西川綾一, "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 – 245, Apr. 1999.

6

TDGA の方針

- Gibbs の自由エネルギー最小化原理に基づく選択操作
 - 温度 T で熱平衡状態のシステムでは、状態の定常分布は自由エネルギー $F = E - HT$ を最小化
- TDGA では選択操作で F を最小化する個体を選択

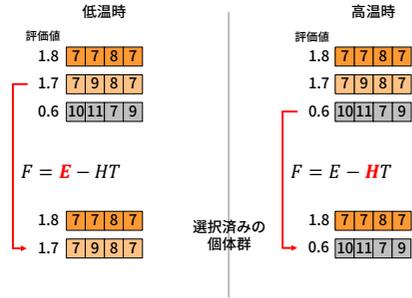
各変数の意味と TDGA での解釈

変数	意味	TDGA での解釈
E	システムの平均エネルギー	個体群の評価値の平均を負にした値
H	エントロピー	個体群の多様性
T	温度	低温では評価関数値重視 高温では多様性重視

7

TDGA の選択操作

- 次世代の個体群の自由エネルギー F が最小になる個体を選択



8

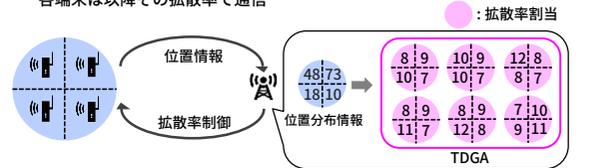
制御対象と目的

- 一万台規模の移動可能な LoRa 端末から複数の基地局に向けて位置情報データを送信
 - 見守りサービスなどを想定
- 端末の位置情報に基づいて最適な拡散率を割当
 - パケット到達率を高めつつ総消費電力を一定値以内に抑制
 - 遺伝的アルゴリズムの評価関数として、各個体についてのパケット到達率と消費電力を用いるように設計

9

提案手法の構成

- 制御対象エリアをいくつかのサブエリアに区切る
- 基地局は端末からのデータに含まれる位置情報を収集、サブエリアごとの端末数を計算
- 一定周期でTDGAを実行し拡散率割り当ての選択肢を更新、評価値が最良のものを出力
- 拡散率の割り当ては一定周期でブロードキャストし各端末は以降その拡散率で通信



10

パケット到達率に関する評価関数

- ALOHA において n 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とき、パケット発生率 $\mu = np$
- 単位時間中に x 個のパケットが発生する確率 $P(x)$ はポアソン分布で表され

$$P(x) = \frac{\mu^x}{x!} e^{-\mu}$$
- 1 個のパケット送信時間を T とすると、時刻 $-T$ から T の間に他のパケットが発生せず、衝突せずに送信される確率 P_{ALOHA} は

$$P_{ALOHA} = P(0)^2 = e^{-2\mu T}$$
- 送信経路中のパケットエラー率を PER とすると、想定する LoRaWAN 通信システムのパケット到達率 F_{arr} は

$$F_{arr} = (1 - PER)e^{-2\mu T}$$
- 同一の拡散率を使用する端末数を n とし、拡散率ごとの F_{arr} の平均を評価関数とする
 - パケットエラー率は拡散率と伝搬距離によって決定するモデルを使用

11

消費電力に関する評価関数

- 全端末の送信にかかる消費電力の合計値で評価

$$F_{pow} = \frac{P - n\text{Pow}(12)}{n(\text{Pow}(12) - \text{Pow}(7))}$$
 - 全端末が消費電力最小の拡散率 7 で $F_{pow} = 1$
 - 全端末が消費電力最大の拡散率 12 で $F_{pow} = 0$

- また事前に設定した合計消費電力の上限値を超えるとペナルティとして F_{pow} を $1 / 100$ する

- 各個体について F_{arr} と F_{pow} の合計値を計算し評価値とする

12

エントロピーの計算

- 多様性の指標として遺伝子座ごとのエントロピー H^1 を使用

$$H^1 = \sum_{k=1}^M \left(- \sum_{j \in \text{allele}} p_j^k \log p_j^k \right)$$

- 遺伝子座 k : ゲノム中の遺伝子の位置
- allele (対立遺伝子) j : 遺伝子座ごとのとりうる値
 - 設定可能な拡散率である 7 から 12 の整数
- p_j^k : 個体群全体の遺伝子座 k での対立遺伝子 j の存在確率
 - 遺伝子座ごとにそれぞれの拡散率の個数を個体群のサイズで割った値

13

提案手法の評価

- LoRaWAN の通信モデル
 - 15km 四方のエリアに基地局 5 台を設置
 - 固定の端末 6000 台を配置
 - 各端末は 32 Byte の位置情報データを 100 秒に 1 回送信
 - 5 台の基地局のうち 1 台でもデータを受信すれば受信成功
- エリート戦略を使用する遺伝的アルゴリズム (SGA) と比較
- GA 呼び出し毎の出力した個体の評価値 (fitness) で評価

14

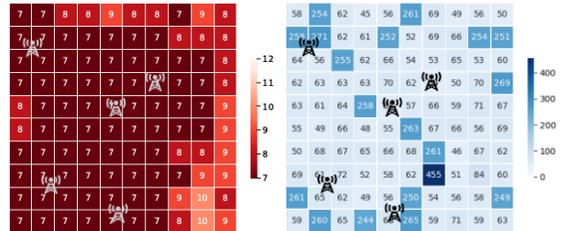
シミュレーション設定

- TDGA/SGA の設定
 - シミュレーション時間: 10000 秒
 - エリア区切り数: 10 x 10
 - 個体群サイズ: 500
 - 電力上限値: 792 mW
 - 50 秒に一回呼び出し、その度に 100 世代計算
- 環境変動モデル
 - ランダムに選ばれたサブエリア 20 個それぞれに端末 200 台を追加
 - 追加された端末群は 2500 秒ごとに隣接するサブエリアに移動
- 複数のパラメータでシミュレーションを 10 回ずつ実行
 - TDGA: 温度 T を変更
 - SGA: エリート数を変更

15

端末配置と拡散率割り当ての例

- シミュレーションでの拡散率割り当てと端末・基地局の配置の一例



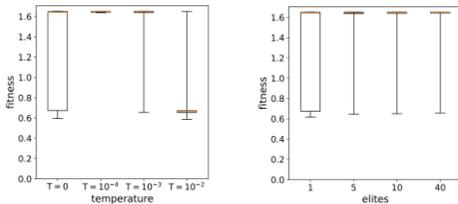
拡散率割り当ての例

基地局およびある時刻での端末の配置

16

シミュレーション結果: fitness の分布

- $T = 10^{-4}$ の TDGA 以外は電力制限を満たす解が発見できていない時刻がある
- 適切な温度 T を設定することで、動的に変化する環境における適切な制御が可能

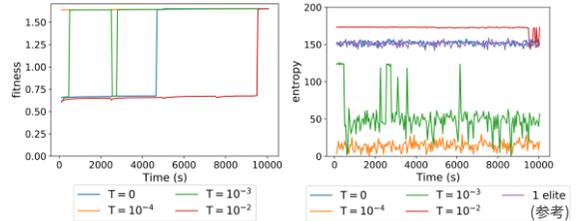


各パラメータでの全 10 回のシミュレーションの fitness 分布

17

シミュレーション結果: fitness の推移

- $T = 10^{-4}$ で常に消費電力の制約をクリア
- $T = 10^{-3}, 10^{-2}$ の高温では評価値の高い個体が次世代に残りづらい
- $T = 0$ では SGA とほぼ同じ動作



TDGA での各パラメータでの 1 シミュレーションの fitness (左) とエントロピー (右) の推移

18

まとめと今後の課題

まとめ

- 変動する環境において LoRaWAN の拡散率の適切な制御を行う手法を提案
- TDGA の適切な温度パラメータ T で消費電力の制限を満たしつつパケット到達率を高める制御が可能
 - 温度が高すぎると多様性に傾倒し評価値の高い解の発見が遅れる
 - 温度が低すぎると環境への適応が遅れる

今後の課題

- 温度パラメータ T を効率よく、または自動的に決定する方法
- より TDGA が有効となる状況を調査