

# IoTサービスの満足率を考慮した ZigBee と無線 LAN の チャンネル制御手法

錦織 秀<sup>1</sup> 木下 和彦<sup>2</sup> 谷川 陽祐<sup>3</sup> 戸出 英樹<sup>3</sup> 渡辺 尚<sup>1</sup>

概要 : IoT (Internet of Things) サービスの実用化により, 同一周波数帯を使用する ZigBee と WiFi の共存環境が増加している. これらの間で電波干渉が起これると ZigBee 側のパケットのシンク到達率が低下するため, WiFi との干渉を避けるように ZigBee の利用チャンネルを遷移させる手法が数多く提案されているが, WiFi のチャンネルも制御することで ZigBee の到達率を更に改善できると考えられる. そこで本稿では, ZigBee パケットの到達率が低下した場合に, ZigBee の利用チャンネルの変更処理に加え WiFi の AP に当該利用チャンネルを包含する WiFi チャンネルの利用を一定期間停止させることでも干渉を回避することにより, ZigBee の到達率を改善する協調的チャンネル制御手法を提案, 評価する.

## A Cooperative Channel Control Method of ZigBee and Wireless LAN for IoT Services

Shu NISHIKORI<sup>1</sup> Kazuhiko KINOSHITA<sup>2</sup> Yosuke TANIGAWA<sup>3</sup> Hideki TODE<sup>3</sup> Takashi WATANABE<sup>1</sup>

### 1. はじめに

近年, 自動車や電化製品などが能動的に通信しながら制御を行う IoT (Internet of Things) ネットワークが注目され, センシング技術の向上やデバイスの低価格化によって適用領域が拡大している [1]. この IoT の発展に伴い, ZigBee の利用が増加しているが, ZigBee は現在 WiFi が主に使用している 2.4GHz 帯を使用するため, 同周波数帯における ZigBee と WiFi の共存環境が増加している [2].

ZigBee と WiFi が共存する環境の問題点として, WiFi の送信電力が ZigBee より大きいため両ネットワーク間で電波干渉が起これると ZigBee のパケットロスが増大することが挙げられる [3].

この問題を解決するためには, 空間領域, 時間領域, 周波数領域のいずれかで干渉を回避すればよい. 本研究では無数のデバイスが遍在する IoT ネットワークを想定しているため, 空間領域で干渉回避を行う手法は不適切である. 同様に, 膨大な数のデバイス間で時刻同期をとることが難しいことから時間領域での回避も現実的でない. 従って,

周波数領域で干渉回避を行う手法を考える. 既存研究では, WiFi との干渉を避けるように ZigBee の利用チャンネルを遷移させる [2][4] が, ZigBee と WiFi 両方の利用チャンネルを制御する研究はなされていない. 両ネットワークの利用チャンネルを制御することでより効率的にチャンネルを利用でき, WiFi の影響による ZigBee パケットの到達率の低下を回避できると考えられる. そこで本稿では, ZigBee と WiFi の協調的なチャンネル制御手法を提案する.

提案手法では, 干渉により ZigBee パケットの受信率が低下した場合, ZigBee の利用チャンネルの変更に加え, WiFi の AP に当該利用チャンネルを包含する WiFi チャンネルの利用を一定期間停止させることで干渉を回避する. ここで, WiFi のチャンネル利用停止によりスループット低下が予測されるため, ZigBee のためにチャンネル利用を過剰に制限させないように制御する.

以降, 第 2 章においては, ZigBee と WiFi の共存環境における既存研究について述べる. 第 3 章においては, 提案手法について述べる. 第 4 章においては, シミュレーションモデルの説明と, 評価を行う. 最後に第 5 章において結論を述べる.

<sup>1</sup> 大阪大学大学院情報科学研究科

<sup>2</sup> 徳島大学大学院理工学研究部

<sup>3</sup> 大阪府立大学大学院工学研究科

## 2. 関連研究

ZigBee と WiFi は同一周波数帯を用いているため、両ネットワークが同じ場所に配置された場合、両ネットワーク間で干渉が発生する。この際、電波の送信電力に差があるため、WiFi からの電波干渉により ZigBee のパケットロスが増大する点が問題となる。このような問題を解決するために、多くの手法が提案されている。

文献 [3] では、Signaler というデバイスを用いる。Signaler が ZigBee デバイスの通信と同時に、通信チャンネルとは別の ZigBee チャンネルを用いて ZigBee デバイスの通信よりも強い電力でビジートーンを送信し、WiFi が Signaler のビジートーンを検知することで間接的に ZigBee デバイスの通信を発見しやすくする (図 1)。このビジートーンはデータが送信されてから ACK が返されるまで発信される。この手法では、Signaler を用いない手法に対して WiFi

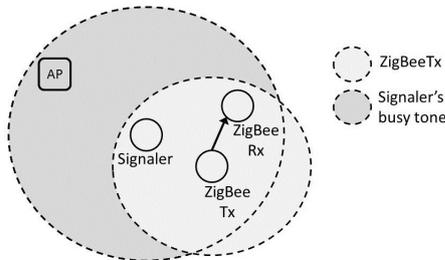


図 1 文献 [3] の手法の動作

の存在する環境下での ZigBee の衝突率を半減させている。また、ZigBee デバイスそのものに変更を加える必要が無いため、現行の ZigBee デバイスをそのまま使用することができる。しかし、Signaler は ZigBee デバイスと協力するために ZigBee のパケットをデコードできなければならない上、WiFi が電波を検知できるように通常のデバイスよりも強い電波を発する必要がある。また、ZigBee デバイスが遅延に厳しいアプリケーションを扱っていた場合、WiFi のバースト的な通信発生に対処するために常時 Signaler を起動させる必要がある。従って、大容量バッテリーを備えた Signaler 用の ZigBee デバイスが必要となる。また、通信以外の電波でチャンネルを 1 つ占有してしまうため、周波数の利用効率が低下するという問題もある。

文献 [4] では、図 2 のようにクラスタツリーを形成し、クラスタヘッド (ClusterHead:CH) デバイスは次のクラスタのブリッジ (BRIDGE:BRD) デバイスと通信する。図 3 のように同じチャンネルを用いているクラスタ内の一部のデバイスが干渉したとき、他のデバイスは干渉を検知することができないため、干渉しているデバイスは Channel Change Broadcast Message (CCBM) を流して干渉発生を伝える。干渉判定については、宛先デバイスからの ACK を予め

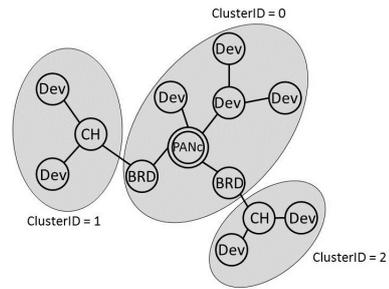


図 2 文献 [4] でのクラスタリング

決定した閾値の回数だけ連続して受信できなかった場合に、現在使用しているチャンネルは干渉していると判断する。CCBMを受信したデバイスは、PAN ID, ClusterID, 現在の利用チャンネルなどを基にして変更先のチャンネルを各デバイスで導出する。同クラスタ内のデバイスならば生成される変更先チャンネルは等しくなる。ただし、変更先のチャンネルでも別の干渉が発生する可能性がある。従ってチャンネルを移動した後、各デバイスは  $t_{reconf}$  の時間だけ待ち、その間に干渉により周囲のデバイスを発見できなければ変更先チャンネルは不適であると判断する。CH や PANc (PAN Coordinator) 以外のデバイスが不適と判断したならば、再度ネットワークに参加する手続きを行う。CH や PANc が不適と判断したならば、再度干渉検知・回避の手続きを行い、別のチャンネルに移動する。(干渉中に受信したパケット数) / (理想環境下で受信するパケット数) を Frame Error Rate (FER) として定義すると、この手法ではこの FER を 0.2 以下に保つことができる。また、次に使用するチャンネルを各デバイスそれぞれで導出することができるため、制御メッセージを流す回数を減らすことができる。ZigBee デバイスのエネルギーの節約のために余分な制御メッセージは流さないほうが好ましい。しかし、チャンネル変更に失敗した際に、ネットワークに再参加する手続きが必要であるため、遅延に厳しいパケットを扱っていた場合に、許容される遅延以内にシンクまでパケットが届かなくなるという問題がある。

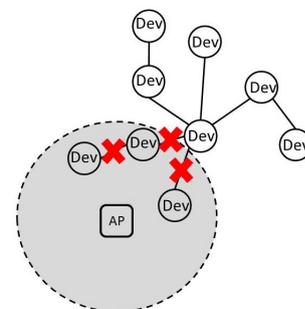


図 3 一部のデバイスで干渉が発生する例

文献 [5] では、ZigBee デバイスが CCA (Clear Channel Assessment) 期間中に検知した電波が ZigBee と WiFi のど

ちらであるかによって、バックオフ時間を適応的に変更する。ZigBee デバイスは送信を行う前に、 $[0, 2^{BE}]$  ( $3 \leq BE \leq 5$ ) の一様分布からランダムに選ばれた時間だけバックオフして CCA を行うが、キャリアセンスの CCA 中に WiFi の電波を検知したときは、次回のこのバックオフの一様分布の範囲を  $[0, 2CCA]$  に変更する ( $2CCA$  は CCA にかかる時間の 2 倍の時間のことである)。ZigBee 電波を検知したときは、通常バックオフで動作する。この手法により、WiFi が ZigBee ネットワークの内部に存在する環境での ZigBee の通信成功率を、10% から 20% に向上させている。しかしこの手法では、検知した電波が ZigBee と WiFi のどちらから送信されたのかを判別する必要があり、デバイスのコストが増加する点が問題となる。

### 3. 提案手法

既存研究では、WiFi の直接的な制御は行っていない。これに対し、WiFi が ZigBee に協力的である場合において、WiFi も ZigBee と干渉しないように制御を行うことで、さらなる ZigBee と WiFi の干渉回避の効果が期待される。

#### 3.1 想定ネットワークモデル

ZigBee ネットワーク内に WiFi が存在する状況を図 4 に、提案手法で想定する ZigBee と WiFi の利用チャンネルを図 5 にそれぞれ示す。全デバイスは共通の集約デバイス (シンク) 宛の packets を周期的に発生させる。この領域全域をカバーする複数チャンネルを同時に使用可能な AP (Access Point) が 1 つ存在し、WiFi を用いて STA (STation) へのデータ送信を行う。この ZigBee と WiFi の両ネットワークが同一の周波数帯を使用する。利用チャンネルとして、ZigBee がチャンネル 11-14, 16-19, 及び、21-24 を、WiFi がチャンネル 1, 6, 及び、11 を使用する。ZigBee のチャンネル 15, 20 は隣接している 2 つの WiFi チャンネルと干渉する [6] ため、チャンネル 23, 24 は制御を簡単にするため、それぞれ使用しないものとする。また、WiFi は ZigBee に協力的であり、シンクと AP はバックボーンで接続されているものとする。

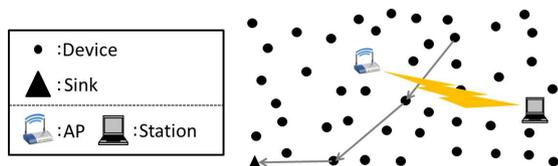


図 4 ZigBee ネットワークと WiFi が共存している例

#### 3.2 概要

ZigBee がマルチホップ通信を行う場合、特定のデバイス間の無線リンク群が同じチャンネルを使用しなければならない。ZigBee ネットワークにおいて、この同じチャンネルを使

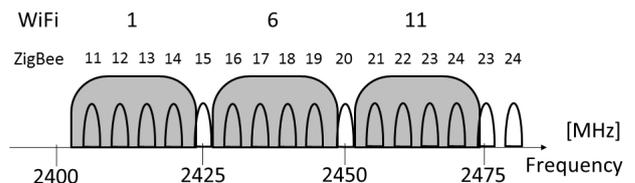
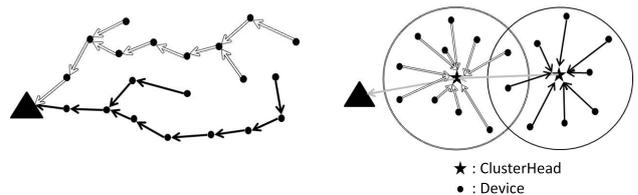


図 5 ZigBee と WiFi の利用チャンネル

用しなければならない無線リンク群を以後「チャンネル単位」と呼ぶ。従来のクラスタツリー型トポロジでは、図 6(a) のようにチャンネル単位はシンクを根とする各サブツリーである。一方、提案手法では図 6(b) のようなクラスタリングを考え、各クラスタ内通信および各クラスタヘッド (CH) 間通信を 1 つのチャンネル単位とし、クラスタ内とクラスタ間のパケット伝送は時間で分割して交互に行う。従って、CH と非 CH で同一のチャンネルが利用される。各デバイスの時間同期は ZigBee のビーコンを用いて行われる。各デバイスが生成するデータは CH に送信された後、CH のみで構築された経路に沿って、マルチホップでシンクまで送られる。



(a) 従来のクラスタツリー (b) 提案手法におけるクラスタリング

図 6 経路の形成

ZigBee を用いるアプリケーションが要求する到達率の指標として、要求パケット到達率  $a = p/q$  ( $p \leq q$ ) を用いる [7]。以下に定義を説明する。あるデバイスから要求パケット到達率が  $a$  のパケットフローが発生した場合、そのデバイスから送信されたシーケンス番号が連続する  $q$  個のパケットを 1 つのグループとし、送信したパケットに対して取り得るすべてのグループを作成する。グループ内のパケットのうち  $p$  個以上のパケットがシンクに到達していれば、そのグループは要求が満足されたものとする。図 7 は、 $p = 1, q = 3$  の場合の例である。シンクが受信したパケットフローに対しパケット 3 個のグループを全て作成し、そのグループの中のパケットのシンクまでの到達個数を計算する。このグループの中の到達個数が 1 個以上であれば、そのグループの要求パケット到達率は満足される。

提案手法は、電波干渉によりこの要求パケット到達率  $a$  を満たせない可能性がある場合に ZigBee の利用チャンネルを変更する。更に、要求パケット到達率  $a$  を満たせない可能性がより高い場合には、WiFi の AP に当該利用チャンネルを包含する WiFi チャンネルの使用を制限させることで、より確実に干渉を回避する。以後、AP の利用チャンネルを

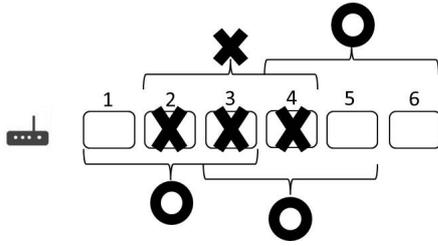


図 7 要求パケット到達率 1/3 の場合の計算例

制限することを「チャンネル解放」と呼ぶ。以下では、これらの具体的な方法についてクラスタ内通信とクラスタ間通信に分けて説明する。

### 3.3 クラスタ内通信

まず、クラスタ内通信での処理について説明する。各 CH は、3.3.1 節と 3.3.2 節の処理に基づいて利用する ZigBee チャンネルの変更、及び、AP へ変更先チャンネルを包含する WiFi チャンネル解放の要求を行う。チャンネル変更は、CH から非 CH デバイスへ通知することで実現される (図 8)。チャンネル解放要求は、CH がシンクまで伝えた後、シンクから AP へバックボーンネットワークを通じて要求される。

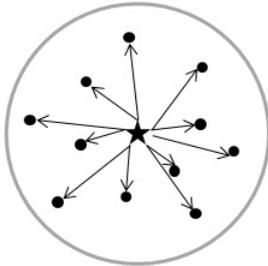


図 8 チャンネル変更の通知方法 (クラスタ内通信)

#### 3.3.1 ZigBee のチャンネル変更と AP へのチャンネル解放要求

各 CH は、自クラスタ内の非 CH デバイスからパケットを受信すると、そのデバイスから発生した直近  $q$  個のパケットの受信個数  $r$  に対して、 $r/q$  を達成中の到達率  $d$  としてパケットのヘッダに付加する。図 9 は要求パケット到達率 1/4 のパケットフローを図 9 のように受信した場合の達成中の到達率の計算例である。 $d$  が不等式

$$d \leq (p+1)/q$$

を満たすならば、 $q$  個のパケットの中で更に 2 つのパケットがロスすると要求パケット到達率を満たせなくなるため、CH は自クラスタ内通信に用いるチャンネルを変更し、非 CH デバイスに変更先チャンネルを通知する。更に、

$$d \leq p/q$$

を満たすならば AP へチャンネル解放を要求する。ただし、

ZigBee がチャンネル変更をするとき、変更前と変更後の ZigBee チャンネルをそれぞれ包含する WiFi チャンネルが異なる場合は、必ず AP に WiFi チャンネルの解放を要求する。

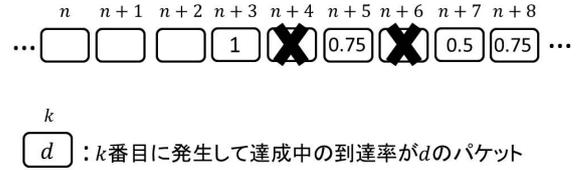


図 9 達成中の到達率の計算例

#### 3.3.2 ZigBee の変更先チャンネルの選択

前節の処理で ZigBee のチャンネル変更が決定された場合、可能な限り変更前と変更後のチャンネルが同じ WiFi チャンネルに包含されるようにチャンネルを選択する。これにより、チャンネル解放要求を出す WiFi チャンネルを 1 つの ZigBee ネットワークにつき 1 つに限定できるため、WiFi のチャンネル使用が過剰に制限されにくくなる。具体的には、以下の処理に基づいて変更先チャンネルを選択する。

非 CH デバイスは、送信するパケットを保持していないとき、次のパケット送信まで他の ZigBee チャンネル群  $Z = \{z \mid z \in W_1 \cup W_6 \cup W_{11}\}$  を順にオーバヒアし、各チャンネル  $z$  で通信を検出したチャンネル単位の種類数  $c_z$  の集合  $C = \{c_z \mid z \in Z\}$  を自クラスタの CH に通知する。ただし、図 5 に示す番号  $n$  の ZigBee チャンネルを  $z_n$  とし、 $W_1 = \{z_{11}-z_{14}\}$ ,  $W_6 = \{z_{16}-z_{19}\}$ ,  $W_{11} = \{z_{21}-z_{24}\}$  とする。

変更前、変更先のチャンネルをそれぞれ  $z_{\text{now}}$ ,  $z_{\text{next}}$  とし、 $z_{\text{now}}$  を包含する WiFi チャンネルを  $W_{\text{NOW}}$  とする。ただし、 $\text{now}$ ,  $\text{next}$  は ZigBee のチャンネル番号、 $\text{NOW}$  は WiFi のチャンネル番号である。各 CH は、前節で述べたチャンネル変更の条件を満たすパケットを受信したとき、その送信元デバイスが通知した  $C$  の中で  $\min\{c_z \mid z \in W_{\text{NOW}}\}$  となるチャンネル  $z_{\text{min}}$  を選出し、 $z_{\text{next}} = z_{\text{min}}$  とする。このとき、 $z_{\text{next}} = z_{\text{now}}$  であれば、WiFi チャンネル  $W_{\text{NOW}}$  内の ZigBee チャンネルで要求パケット到達率を満足させることは困難であると判断し、隣接 WiFi チャンネル  $W_{(\text{NOW}+5) \bmod 15}$  内の  $\min\{c_k \mid k \in W_{(\text{NOW}+5) \bmod 15}\}$  となるチャンネル  $z'_{\text{min}}$  を  $z_{\text{next}} = z'_{\text{min}}$  とする。 $W_{(\text{NOW}+5) \bmod 15}$  に変更した場合は、次のチャンネル変更では、元の所属していた WiFi チャンネル  $W_{\text{NOW}}$  内の  $\min\{c_z \mid z \in W_{\text{NOW}}\}$  となるチャンネル  $z$  を選択する。

#### 3.4 クラスタ間通信

クラスタ間通信についても、各 CH が ZigBee チャンネルの変更、及び、AP へのチャンネル解放の要求の判断を行う。ただしクラスタ内通信とは異なり、変更先のチャンネルはシンクが選択する。ZigBee チャンネルの変更は、シンクに通知

した後、シンクからチャンネルを変更する必要がある各 CH に通知することで実現される (図 10)。一方、AP へのチャンネル解放要求の伝送方法は、クラスタ内通信の場合と同様である。

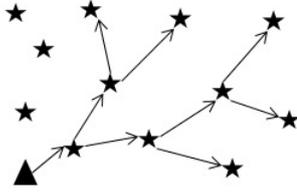


図 10 チャンネル変更の通知方法 (クラスタ間通信)

### 3.4.1 ZigBee のチャンネル変更と AP へのチャンネル解放要求

ZigBee の利用チャンネル変更を決定する手順について説明する。クラスタ内通信と異なり、各 CH は使用するチャンネルでの干渉の大きさを  $q$  回調べるため、バッファに保持しているパケットを  $d$  の値が大きい (要求パケット到達率の観点では重要でない) 順に  $2q - 1$  個送信し、次ホップの CH は再度このパケットの達成中の到達率  $d'$  を計算する。このとき、ヘッダの付け替えは行わないが、この  $d'$  を新たな達成中の到達率としてクラスタ内通信と同様の手順で ZigBee のチャンネル変更と AP へのチャンネル解放要求を行う。

$2q - 1$  個のパケットを送り終えるまでにチャンネルが変更されなければ使用中のチャンネルの干渉は大きくないと判断し、以後はバッファに保持しているパケットの内、 $d$  の値が小さい (要求パケット到達率の観点で重要である) 順に送信する。一方、 $2q - 1$  個のパケットを送信している途中で、 $d$  の値が小さいパケット順に送信している途中でチャンネルが変更されたときは、その時点から再度バッファに保持しているパケットを  $d$  の値が大きい順に  $2q - 1$  個送信する。

### 3.4.2 ZigBee の変更先チャンネルの選択

各 CH は  $c_z$  の和  $S_z$  を計算してシンクに通知し、この  $S_z$  を用いて変更先の ZigBee チャンネルをシンクが選択する。手順はクラスタ内通信の  $c_z$  を  $S_z$  に置換したものである。

### 3.5 AP のチャンネル解放

最後に、AP のチャンネル解放について説明する。AP は、ZigBee の CH からシンクを通してチャンネル解放要求を受けた場合、その CH の変更先 ZigBee チャンネルを包含する WiFi チャンネルの利用を一定時間停止する。利用停止中に同一チャンネルの解放要求を受けた時は更にその時点から一定時間チャンネルの利用を停止するが、受けなければ、そのチャンネルを再使用する。なお、チャンネル解放要求を受けた際にチャンネルの利用を停止する時間は、予め決めておく。

## 4. 性能評価

### 4.1 シミュレーションモデル

提案手法の有効性を評価するため、図 4 に示す環境を想定したシミュレーションを行った。

性能評価における、アプリケーションが 5 つ存在する ZigBee ネットワークのトポロジを図 11 に示す。5m×5m の正方形領域を 1m×1m の格子に分割し、各格子内部のランダムな位置に ZigBee デバイスを、アプリケーション 1 つにつき 1 つ配置する。シンクの位置は左下の格子内に固定し、CH の位置は図 11 に示している格子内に固定する。なお、ZigBee の各アプリケーションのデバイスは、同じアプリケーションのデバイス間でのみ通信を行うものとする。これら ZigBee デバイスの電波が到達しない場所に、WiFi を用いる AP 1 台と STA 3 台を配置する (図 12)。このトポロジは、AP と STA がキャリアセンスで ZigBee の電波を検知することができないため、提案手法の効果が顕著に表れる環境である。また、提案手法による ZigBee 同士の干渉回避の効果を評価するため、ZigBee のチャンネル 13-14 を使用不可能とすることで ZigBee ネットワークの通信容量を小さくした。図 13 に利用可能 ZigBee チャンネルとその初期状態をそれぞれ示す。

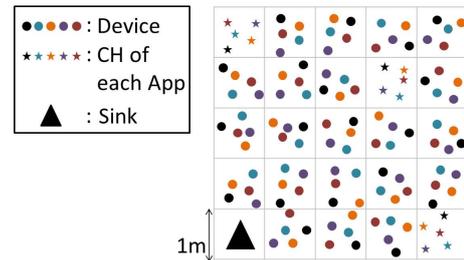


図 11 ZigBee ネットワークのトポロジ

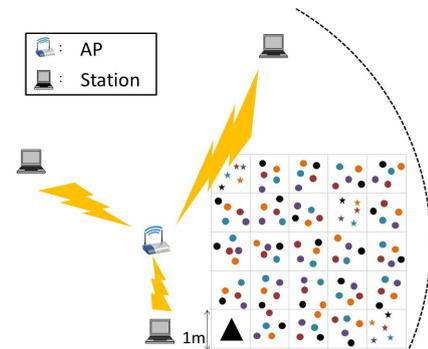


図 12 シミュレーション環境

ZigBee のパラメータを以下に示す。

- データサイズ : 60[Byte]
- 発生 : 0.5[s] 周期
- 要求パケット到達率 : 2/5

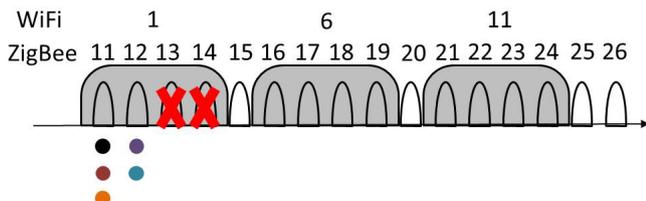


図 13 利用可能 ZigBee チャンネルと初期状態

- 通信可能距離：5[m]

続いて、WiFi のパラメータを以下に示す．なお、使用するプロトコルは 802.11b であり、AP から STA への通信のみを発生させた．

- データサイズ：20[MByte]
- 発生：率  $\lambda$ [packets/s] のポワソン到着過程
- 通信可能距離：30[m]

最後に、提案手法に関するパラメータを以下に示す．

- クラスタ内/クラスタ間通信時間：各 1[s]
- WiFi チャンネル解放時間：10 [s/request]

ZigBee の評価指標として、要求パケット到達率の満足率を用いた．これは、要求パケット到達率に対して、その要求が満たされた割合である．具体的には、3.2 節で説明した、パケットフローに対して作成する全てのグループのうち、満足されたグループの割合として算出した．図 14 は要求パケット到達率 1/3 のときの満足率の計算例である．

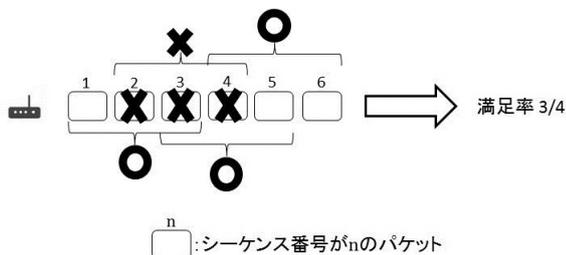


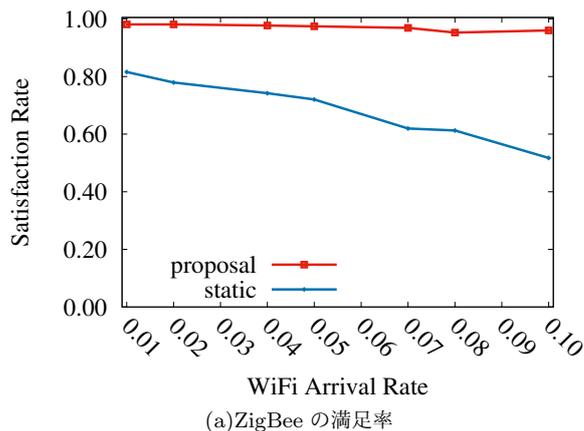
図 14 要求パケット到達率 1/3 のときの満足率の計算例

また、WiFi の評価指標として、受信データ量比を用いた．これは、各 STA がシミュレーション中に受信したデータ量の平均を比較手法のその値で正規化した値である．

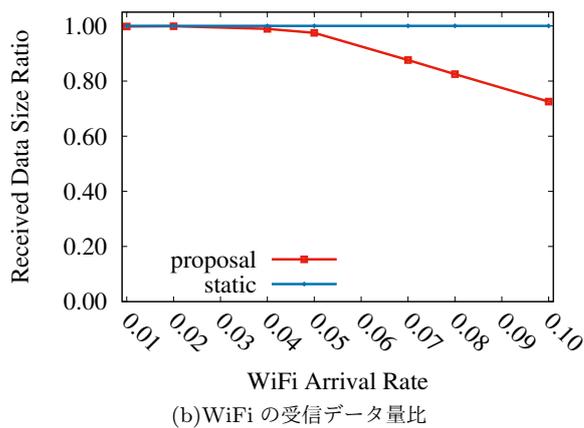
#### 4.2 評価結果

シミュレーション結果を図 15 に示す．横軸は  $\lambda$  で、縦軸は図 15(a) が ZigBee の満足率、図 15(b) が WiFi の受信データ量比である．

図 15(a) より、WiFi の到着率が大きくなるに従って満足率が低下しているが、提案手法は比較手法より大幅に高い満足率を示していることがわかる．その上、提案手法は WiFi 到着率が高くなってもほぼ 100% の満足率を達成している．これは ZigBee と WiFi の協調により WiFi が使用チャンネルを制限したことで、ZigBee の WiFi からの電波



(a) ZigBee の満足率



(b) WiFi の受信データ量比

図 15 性能評価結果

干渉の発生を抑制した上、ZigBee 同士の干渉も回避したことにより、ZigBee の通信成功率が上昇したためである．一方、図 15(b) より、提案手法の受信データ量の低下は、30% 以内に抑えられている．これは、WiFi のチャンネル使用が過剰に制限されないよう、ZigBee がチャンネル選択を行っているためである．

#### 5. おわりに

本研究では、ZigBee と WiFi の共存環境において、ZigBee パケットのシンク到達率を改善することを目的とし、ZigBee と WiFi が協調してチャンネルを利用するチャンネル制御手法を提案した．また、計算機シミュレーションにより、ZigBee の満足率と WiFi の受信データ量比を指標として提案手法の有効性を確認した．

今後の課題として、AP が複数存在して WiFi 同士の干渉が発生する場合や、非協力的な AP が存在する場合などの検討が挙げられる．

#### 謝辞

本研究開発は総務省 SCOPE (受付番号 155007006) の委託を受けたものである．

## 参考文献

- [1] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari and M. Ayyash, “Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications,” *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 17, no. 4, pp. 2347–2376, 2015.
- [2] L. Tytgat, O. Yaron, S. Pollin, I. Moerman and P. Demeester, “Analysis and Experimental Verification of Frequency-Based Interference Avoidance Mechanisms in IEEE 802.15.4,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 23, no. 2, pp. 369–382, April 2015.
- [3] S. Pollin, I. Tan, B. Hodge, C. Chun and A. Bahai, “Harmful Coexistence Between 802.15.4 and 802.11: A Measurement-based Study,” *Proc. CrownCom 2008*, May 2008.
- [4] M. S. Kang, J. W. Chong, H. Hyun, S. M. Kim, B. H. Jung and D. K. Sung, “Adaptive Interference-Aware Multi-Channel Clustering Algorithm in a ZigBee Network in the Presence of WLAN Interference,” *Proc. 2nd International Symposium on Wireless Pervasive Computing*, pp. 5–7, Feb. 2007.
- [5] E. D. N. Ndihi and S. Cherkaoui, “Adaptive 802.15.4 Backoff Procedure to Survive Coexistence with 802.11 in Extreme Conditions,” *Proc. IEEE CCNC 2016*, pp. 556–561, Jan. 2016.
- [6] X. Zhang and K. G. Shin, “Cooperative Carrier Signaling: Harmonizing Coexisting WPAN and WLAN Devices,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 21, no. 2, pp. 426–439, 2013.
- [7] 荒巻敏彦, 木下和彦, 谷川陽祐, 戸出英樹, 渡辺尚, “M2Mサービスの要求パケット到達率を考慮したバッファ制御手法,” 情報処理学会マルチメディア・分散・協調とモバイル (DICOMO2015) シンポジウム, 3C-3, July 2015.