

IEEE802.11 干渉下における IEEE802.15.4 の Ack と LQI を用いた 適応的バックオフ制御方式の提案 Backoff Control Using Ack and LQI on the IEEE802.11 Interference Environment

村上厚介[†]
Murakami Kosuke

小林秀幸[†]
Kobayashi Hideyuki

1. 序論

近距離無線通信規格である IEEE802.15.4[1] はセンサネットワークを設計するために低コスト、低消費電力を目指して策定された規格であり年々注目度が増している。IEEE802.15.4 の適用例として、ホームオートメーション[2]、ヘルスケア [3] などが挙げられる。これらのアプリケーションが広く普及すると、各家庭に無線通信機能を持った電力メータや制御機器、健康医療器などが置かれるようになる。しかし、IEEE802.15.4 は多くの無線通信機器が使用する ISM 帯 (Industry Science Medical Band) を使用している。ISM 帯は、アメリカで使用可能な 868 MHz 帯、ヨーロッパで使用可能な 915 MHz 帯、全世界で使用可能な 2.4 GHz 帯が存在する。その中でも 2.4 GHz 帯は、IEEE802.15.4 を始めとして無線 LAN の規格として広く普及している IEEE802.11[4] にも使用されている。

図 1 に IEEE802.15.4 と IEEE802.11 の使用周波数帯を示す。図 1 より、例えば IEEE802.11 の ch.1(2412 ± 11MHz) は IEEE802.15.4 の ch.11(2405 ± 5MHz)~ch.14(2420 ± 5MHz) と重なっている事が分かる。一般的に、使用周波数帯が重なると通信の競合が起こる。IEEE802.15.4 の最大送信力は 0dBm であり、IEEE802.11 の最大送信出力は 20dBm である。そのため、通信が競合すると送信電力の小さい IEEE802.15.4 のパケットは IEEE802.11 より干渉を受けて通信が阻害されることが文献 [5][6] によって報告されており、ヘルスケア及びホームオートメーションなどの情報を含んだ IEEE802.15.4 のパケットが損失してしまう恐れがある。そのため、IEEE802.15.4 は IEEE802.11 の干渉を回避する必要がある。

IEEE802.15.4 では、各ノードはデータを送信する前にランダムな待ち時間を設ける事により干渉を回避している。しかし、標準の IEEE802.15.4 は待ち時間を決定する指数の最小値を固定的に用いるため、IEEE802.11n の干渉による伝搬路状況の変化に対応する事が出来ない。本研究ではその指数を伝搬路状況に応じて適応的に変更させる事により干渉を回避する手法を提案し、IEEE802.11n 干渉下で実験を行うことにより提案手法の有効性を検証する。

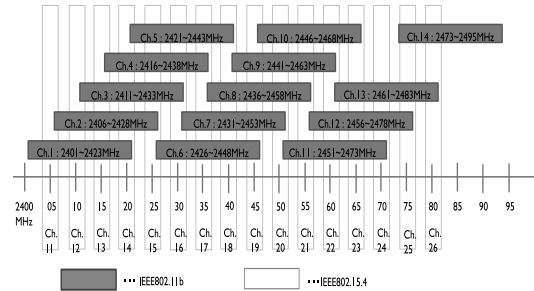


図 1: IEEE802.15.4 と IEEE802.11n の使用周波数帯

2. 原理

2.1. IEEE802.15.4 CSMA/CA アルゴリズム

IEEE802.15.4 ではパケットの衝突を回避する手法として CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) が用いられている。IEEE802.15.4 ではピーコンモードとノンピーコンモードが定義されている。ピーコンモードでは CAP (Contention Access Period) の期間のみ CSMA/CA を用いるが、ノンピーコンモードは常に CSMA/CA を用いて通信を行う。本研究は CSMA/CA に注目するため、ノンピーコンモードを使用する。

図 2 に IEEE802.15.4 のノンピーコンモードにおける unslotted CSMA/CA の動作アルゴリズムを示す。標準で BE_{min} は 3, $MaxBackoff$ は 4 と定められている。まず端末は BE (Backoff Exponent), NB (Number of Backoff) と呼ばれる指数を使用する。 BE は BE_{min} で初期化される。 BE_{min} は 0~8 の値をとる。 NB はバックオフを繰り返した回数であるが、 NB が $MaxBackoffs$ を超えた場合パケットは破棄される。各ノードはデータ送信の前に、バックオフと呼ばれる、0 から $2^{BE} - 1$ までのランダムな値に 0.32[msec] を乗じた値だけ待ち時間を発生させる。待ち時間が経過した後に、各ノードは CCA (Clear Channel Assessment) を行う。CCA では 0.128[msec] の間キャリアセンスを行い、キャリアの使用状況を判定する。キャリアが空いている場合はデータを送信し、空いていない場合は NB をインクリメントする。この時、 BE は $BE+1$ と BE_{max} のうちの小さい値に更新される。 NB の値が $MaxBackOff$ より大きい場合はデータの送信に失敗したとみなす。

このように CSMA/CA は、ノード毎にランダムな待ち

[†] 仙台高等専門学校 情報電子システム工学専攻

表 1: バックオフ制御方式

Priority	closed-loop	open-loop
A.Koubaa[8]	Veddiana[9]	Takahashi[7] Jae[10]

時間を設けることで他ノードとの競合を回避する手法である。しかし、標準の IEEE802.15.4 は BE_{min} を固定的に用いるため、トラヒック増加などの伝搬路状況の変化に対応する事が出来ない。そのため、伝搬路状況に応じてバックオフ期間を制御する必要がある。

2.2. バックオフ制御方式

これまで述べてきたように、IEEE802.15.4 では CSMA/CA が用いられており、バックオフをとる事によって他端末との干渉を回避している。IEEE802.15.4 において、バックオフ期間を制御する研究が既にいくつか行われており、文献 [7] で高橋らはその方式を、優先度型、closed-loop 型、open-loop 型に分類している。我々は高橋らの分類をもとに、我々が調査した文献について表 1 のように分類した。表 1 の一段目は文献 [7] で示されたバックオフ制御方式の分類を表し、二段目以降は各提案方式を表している。表の各要素を以下に説明する。

2.2.1. 優先度型

優先度型は各ノードが発生するデータに優先度を与える方式である。文献 [8] で A.Koubaa らは送信する各データに優先度を設け、高優先のデータには小さい BE_{min} を、低優先のデータには大きい BE_{min} を与えている。その結果、高優先のデータのバックオフ時間は低優先のデータと比較して短くなる。この手法は、輻輳を回避する事を目的としている。また、受信ノードはスケジューラにより高優先のデータを優先して処理を行うため、輻輳の発生を回避することが可能である。しかし、この方式はデータの優先度に応じて BE_{min} を設けることが可能であるが、低優先または高優先の各データに与えられた BE_{min} は固定的に用いられるため、トラヒック増加などの伝搬路状況の変動に対応することが出来ないという問題がある。

2.2.2. closed-loop 型

closed-loop 型は、受信者のトラヒック状況をビーコンを用いて送信者にフィードバックする事で、バックオフ期間を適応させる方式である。文献 [9] で Veddiana らはビーコンモードにおいて、End Device の送信パケット数に応じて BE_{min} を動的に変更する方式を提案している。Coordinator は各 End Device からの送信パケット数をカウントし、各 End Device に対して、送信パケット数に応じた BE_{min} を決定する。その後、それらの情報をビーコ

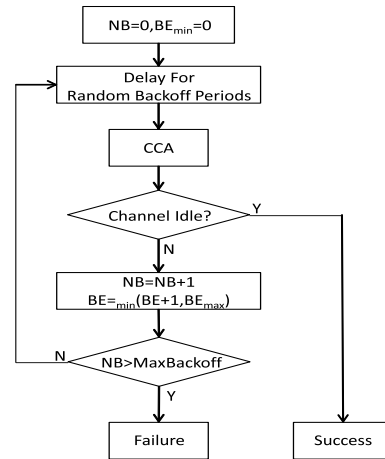


図 2: unslotted CSMA/CA Algorithm

ンフレームを用いて End Device にフィードバックをする。そのため、各ノードが同じ BE_{min} を設定することを避ける事が可能になる。また、トラヒック状況を基にバックオフ制御を行うため、伝搬路状況の変化に柔軟に対応する事が可能である。しかし、フィードバックを用いるためにはビーコンフレームに余分な情報を付加する必要があり、オーバーヘッドが増加し、消費電力の増加に繋がる。また、ノンビーコンモードには適用できないなどの問題がある。

2.2.3. open-loop 型

open-loop 型は、送信者がローカルなトラヒック情報からバックオフ期間を適応させる方式である。open-loop 型の方式として、文献 [7][10] が挙げられる。文献 [10] で Jae らは CCA の結果に応じてバックオフ期間を制御している。しかし、この方式はバックオフ期間を短縮することで消費電力の削減及びスループットの向上を目的としているため、本研究の目的である干渉回避とは目的が異なる。

文献 [7] で高橋らは Ack 受信の有無によってバックオフ期間を制御している。この方式は Ack と伝送レート制御方式である ARF(Automatic Rate Fall-back) [11], AARF(Adaptive ARF)[12] 方式を用いて動的に BE_{min} を変更する。しかし、Ack のみを用いて干渉による伝搬路状況の変化を推定するのは困難であり、伝搬路状況に応じた BE_{min} を設定することが出来ない。また、この方式では適切な BE_{min} を設定する事で消費電力を削減する事を目的としているため、本研究の目的である他規格との干渉回避とは異なる。

2.3. 本研究の目的と提案

既存手法は上記の問題に加え、同一周波数帯を利用する IEEE802.11n との規格間干渉を考慮していない。その

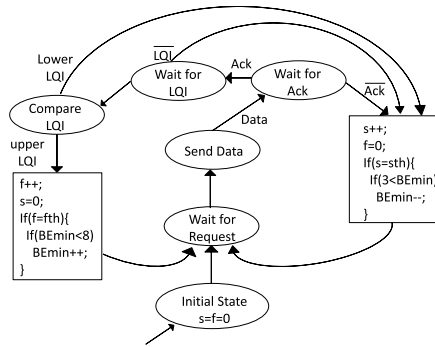


図 3: End Device の状態遷移図

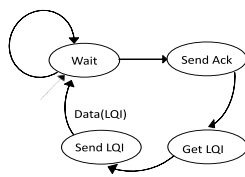


図 4: Coordinator の状態遷移図

ため、本手法では、IEEE802.11n 干渉下において伝搬路状況に応じて動的に BE_{min} を設定することで規格間干渉を回避する手法を提案する。本手法はローカルなトラヒック情報を用いてバックオフ制御を行うため、open-loop 型を採用する。また、本手法は LQI(Link Quality Indicator) を用いてバックオフ期間を制御する。LQI とは受信したデータの信号強度を表す数値であり、0~255 までの数値で表される。同じく、受信したデータの信号強度を表す数値として RSSI(Received Signal Strength Indicator) が挙げられる。RSSI は受信したデータの信号強度を、絶対単位である dBm を用いて表される。

IEEE802.15.4 はデータを受信した際、データを MAC 層に伝えると共に、LQI も通知するように規定されている。そこで我々は LQI を使用することで、既存手法では取得することの出来なかった干渉による伝搬路状況の変化を取得する。これにより、既存手法よりもトラヒックの増加や減少などの伝搬路状況の変化に対して適応的にバックオフ期間を制御することが可能になる。

3. 提案手法

我々は IEEE802.11n の干渉による伝搬路状況の変化に適応的に BE_{min} を変更する手法を提案する。適応的に BE_{min} を変更する手法として open-loop 型である [7] が提案されている。しかし、この手法は Ack 受信の有無で BE_{min} を変更し、端末数の増加による輻輳を回避する手法であるため、他規格からの干渉による伝搬路状況の変化を

取得する事は困難である。そこで我々は LQI(Link Quality Indicator) を用いて伝搬路状況の変化を取得する。LQI は雑音や干渉波によって値が変化するため、伝搬路状況の変化を取得することが可能になる。そのため、Ack のみを用いるよりも詳細な伝搬路状況を取得することが可能になる。しかし、データ送信に失敗した場合、LQI を算出することは不可能である。

そこで我々は Ack と LQI を併用することにより、Ack 受信の有無に加え、受信したデータの受信強度を取得する。その結果、干渉による伝搬路状況の変化を取得する事が可能になり、既存手法よりも伝搬路状況の変化に適応的に対応することが可能になる。

提案手法は、データを送信する End Device とデータを収集する Coordinator で構成される。End Device は Ack と LQI を用いて BE_{min} を動的に変更する。Coordinator は受信したデータの LQI を算出し、End Device に LQI を通知する。図 3,4 に提案手法の End Device 及び Coordinator の状態遷移図を示す。

図 3 は提案手法の End Device の状態遷移図を表す。End Device は、伝搬路の状況に応じた BE_{min} を設定するために Ack 受信の有無と LQI を取得する。LQI は Coordinator が End Device からのデータを受信した時の信号強度である。Coordinator が取得した LQI を End Device に送信することにより、End Device で Ack と LQI を用いて BE_{min} を制御することが可能になる。

End Device は初期状態 Initial State で変数 s , f を初期化する。その後 Wait for Request に遷移し、上位層からの送信要求を待つ。送信要求があった場合は Send Data に遷移し、データを送信する。データ送信終了後、Wait for Ack に遷移し、標準の IEEE802.15.4 で定められている 0.864[msec] だけ Ack を待つ。Ack が返ってきた場合は Wait for LQI に遷移し、Coordinator が取得した LQI が送信されるのを待つ。Compare LQI にて受信した LQI の値が、あらかじめ設定されたしきい値以上かどうかを判定する。しきい値以上であれば、 s をインクリメントする。Ack が返って来ない又は返ってきても LQI がしきい値以下の場合は、伝搬路状況が悪化したと判断して f をインクリメントする。 s は閾値 s_{th} に達した場合、伝搬路状況が良好と判断して BE_{min} をデクリメントする。また、 f は閾値 f_{th} に達した場合は BE_{min} をインクリメントする事で確率的に待ち時間を増やす。その結果、伝搬路の状況に応じた BE_{min} の設定が可能になる。

図 4 は提案手法の Coordinator の状態遷移図を示す。Coordinator では End Device からのデータを受信後に Get LQI に遷移し、受信した信号の LQI を取得する。その後 Send LQI に遷移し、End Device に Coordinator が受信し

たデータの LQI を通知する。

このように Ack を用いて BE_{min} を制御する手法に加え、LQI を用いて伝搬路状況を取得して動的に BE_{min} を変更することで IEEE802.11n 干渉下においても干渉を回避することが可能になる。

4. 提案手法の評価

4.1. 規格間干渉による LQI の変動

IEEE802.11n の通信が IEEE802.15.4 の通信に与える影響については今まで様々な研究が行われてきた。しかし、IEEE802.11n のスループットに対する IEEE802.15.4 の LQI の変化について実験を行った例はない。そこで我々は IEEE802.11n のスループットの変化が近傍に存在する IEEE802.15.4I への程度影響を及ぼすのかを調査するため、IEEE802.11n のスループットに対する IEEE802.15.4 の LQI の変動について実機を用いて測定した。

4.1.1. 実験諸元

実験構成図を図 5 に示す。干渉源となる IEEE802.11n の通信には IEEE802.11n 準拠の無線 LAN カードを搭載した PC を使用し、2 台の PC 間でアドホックモードで通信を行う。IEEE802.11n の通信速度は帯域指定ツールである iperf を用いて 0~30Mbps まで 5Mbps ずつ変化させる。IEEE802.15.4 の通信には東京コスモス電機社製のセンサノードを使用し、2 台のノード間で通信を行う。各センサノード及び PC 間の距離は 1m とする。干渉の影響が観測できるように IEEE802.11n の ch.1(2.401~2.423GHz)、IEEE802.15.4 の ch.13(2.414~2.416GHz) をそれぞれ使用する。本実験では End Device から Coordinator へフレームを 20 回送信し、Coordinator が受信したフレームの LQI を測定し、その平均値をプロットする。

このように干渉源がごく近傍に存在し、両規格の通信が同時に行われる、IEEE802.15.4 にとって高負荷な環境で提案手法の有効性を検証する。

4.1.2. 実験結果

実験結果を図 6 に示す。横軸は干渉源となる IEEE802.11n のスループットを表し、縦軸は IEEE802.15.4 の LQI を示している。IEEE802.11n のスループットが 0Mbps の場合の LQI は 170 であるが、スループットが 30Mbps になると LQI が 140 まで減少する。また、IEEE802.11n のスループットの増加に対して IEEE802.15.4 の LQI が線形に減少していることが分かる。



図 5: 実験構成図

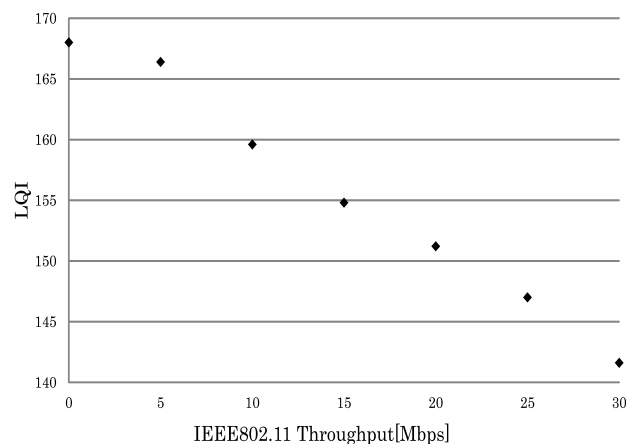


図 6: 実験結果

4.2. パケット到達率の変化

提案手法は規格間干渉を回避することを目的としている。そのため、本節では、IEEE802.11n の干渉下における既存手法と提案手法のパケット到達率を比較することにより、提案手法の有効性を示す。我々は提案手法の有効性を示すため、IEEE802.11n のスループットに対するパケット到達率の変化を実機を用いて測定する。実験は、標準の IEEE802.15.4 ノンビーコンモード、Ack を用いて BE_{min} を動的に変更する既存手法及び提案手法のそれぞれについて測定する。

4.2.1. 実験諸元

表 2 に干渉源となる IEEE802.11n、標準の IEEE802.15.4 ノンビーコンモード、既存手法である Previous 及び提案手法である Proposed の各パラメータを示す。

使用機器及び実験構成は 4.1 節と同じである。我々は 1 回の試行につき End Device から Coordinator へフレームを 100 回送信する。実験はそれを 20 回試行し、測定した

表 2: 実験諸元

	802.11	802.15.4	Previous	Proposed
Data Rate	0~30Mbps	250kbps	250kbps	250kbps
Frequency	ch1	ch13	ch13	ch13
Payload	1Byte	1Byte	1Byte	1Byte
BE _{min}	-	3	3~8	3~8

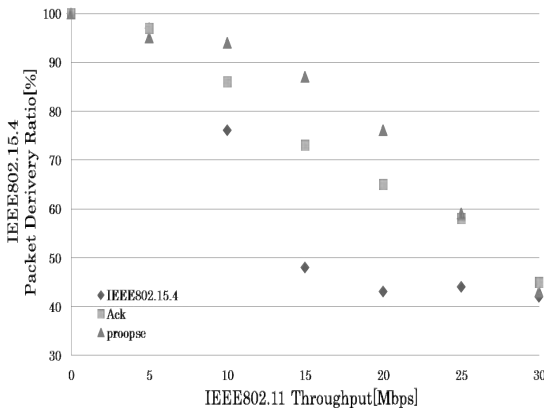


図 7: 実験結果

パケット到達率の平均を求める。また、本稿でのパケット到達率は、Ack が返ってきた回数を、送信した全フレーム数で割った値とする。

4.2.2. 実験結果

実験結果を図 7 に示す。横軸は干渉源となる IEEE802.11n のスループットを表し、縦軸は IEEE802.15.4 のパケット到達率を表している。グラフ中の“IEEE802.15.4”は標準の IEEE802.15.4 ノンビーコンモードの実験結果を表している。また、“Ack”は Ack を用いて BE_{min} を動的に変更する既存手法の実験結果であり、“propose”は Ack と LQI を用いて BE_{min} を動的に変更する提案手法の実験結果を表している。

干渉の影響が無い場合はどの手法もパケット到達率はほぼ 100%であるが、IEEE802.11n のスループットが大きくなるほど、パケット到達率が低下している。また、IEEE802.11n の通信速度が 10Mbps 以上の場合、デフォルトの IEEE802.15.4 のパケット到達率は BE_{min} を動的に変更する他の 2 つの手法よりも低いことが分かる。さらに、IEEE802.11n の通信速度が 10~20Mbps の各点では提案手法は、既存手法に比べてパケット到達率が高くなる。また、提案手法は既存手法と比較して最大で 14.65%パケット到達が向上していることが分かる。

4.3. 考察

我々は 4.1 節で IEEE802.11n のスループットに対する IEEE802.15.4 の LQI の変化について実機を用いて測定を

行った。LQI は受信したデータの信号強度を 0~255 までの数値で表したものである。結果より、IEEE802.11n のスループットの増加に伴い、IEEE802.15.4 の LQI が線形に減少することが言える。IEEE802.11n のスループットが 0Mbps の場合の LQI は 170 であるが、スループットが 30Mbps になると LQI が 140 まで減少する。これは IEEE802.11n のスループットの影響により、IEEE802.15.4 が干渉を受けることを意味する。更に、IEEE802.11n のスループットと LQI に相関がある事から、LQI を用いる事により伝搬路状況の変化を観測することが可能である。このことは、LQI を用いることによって伝搬路状況に適応的に BE_{min} を変更できることを意味する。従って提案手法が実現できる事が分かった。

4.2 節では、IEEE802.11n のスループットに対する IEEE802.15.4 のパケット到達率について測定を行った。結果より、標準の IEEE802.15.4 は他の 2 つの手法と比較して最もパケット到達率が低くなっていることが分かる。これは標準の IEEE802.15.4 は BE_{min} を固定的に用いるため、伝搬路状況の変化に適応的にバックオフ期間を設定する事が出来ないことを意味している。そのため、伝搬路状況が悪化しているにも関わらず短いバックオフ期間のままパケットを送信し、IEEE802.11n のパケットと衝突を繰り返していると考えられる。また、IEEE802.11n の通信速度が 10~20Mbps の各点で提案手法は、既存手法と比較してパケット到達率が最大で 14.65%上回っている。このことは既存手法は、ある程度他規格間干渉の影響を回避できることを意味している。しかしながら、提案手法のように他規格間干渉の影響を観測することはできない。提案手法は LQI を用いて伝搬路状況を観測し、伝搬路状況に応じて適応的に BE_{min} が設定できていることを意味する。従って、干渉源である IEEE802.11n がごく近傍に存在し、両規格が同時に通信を行う高負荷な環境においても提案手法が有効である事が分かった。

5. 結論

本研究では、Ack と LQI を用いて BE_{min} を動的に変更する手法を提案し、IEEE802.11n と IEEE802.15.4 が共存する環境下で、IEEE802.15.4 の通信が安定的に行える手法を提案した。また、本研究では IEEE802.11 干渉下での実機実験により、IEEE802.15.4 の LQI を用いる事で IEEE802.11n とのスループットの影響による通信環境の変化を測定可能であることを示すことができた。また、それにより提案手法の実現性を確認し、実機実験によって提案手法の有効性を確認することができた。提案手法は IEEE802.11n の干渉を受けて伝搬路状況が変動した場合でも LQI により伝搬路状況の変化を観測することで、適

応的に BE_{min} を設定することが可能である。その結果、実機実験により IEEE802.11n 干渉下において提案手法の packets 到達率が既存手法に比べ 15% 程向上することを確認した。この結果、本手法を用いる事で、IEEE802.11n と IEEE802.15.4 が共存する環境において干渉を回避することが可能となることを示した。

今後は、伝搬路状況が良好な場合、閾値 s_{th} を減少させ、悪化した場合は閾値 f_{th} は増加させる事でより伝搬路状況に適応した BE_{min} を動的に変更する拡張を行う予定である。これにより、環境の変化により柔軟に対応できるようになるため packets 到達率をさらに向上することが期待できる。また、より実際的な環境に近づけるために IEEE802.15.4 及び IEEE802.11n の端末を増加させた場合や、ペイロードのサイズを変更した際の packets 到達率の評価及びビーコンモードでの実装を行う予定である。

参考文献

- [1] IEEE Standard for Part 15.4: Wireless Medium Access Control Layer(MAC) and Physical(PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks(LR-WPANS), Sep.2006
- [2] Caio Augustus Bolzani, et al., "Domotics Over IEEE802.15.4 A Spread Spectrum Home Automation Application," IEEE International Symposium, pp396-400, 2006
- [3] L.Liu, et al., "Development of wireless smart sensor for structural health monitoring," proc. of SPIE vol.5765, pp176-186, 2005
- [4] IEEE Standard for Part 11: Wireless LAN Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications, Mar.2012
- [5] Axel Sikora, et al., "Coexistence of IEEE802.15.4 of other Systems in the 2.4GHz-ISM-Band," IMTC 2005, pp.1786-1791, May.2005
- [6] B Polepalli, et al., "Impact of IEEE802.11n Operation on IEEE802.15.4 Operation International Conference on Advanced Information Networking and Applications," Workshop2009, pp328-333, 2009
- [7] 高橋淳, et al., "センサネットワークにおける QoS を考慮した衝突回避のための適応的バックオフ制御方式," 信学技報, Vol.2008, no221, pp.373-378, Mar.2007
- [8] A Koubaa, et al., "Improving the IEEE802.15.4 slotted CSMA/CA MAC for Time Critical Events in Wireless Sensor Networks," In Proc. of the Workshop of Real-time Networks, July.2006
- [9] Veddiana Prakash Rao, et al., "Adaptive Backoff Exponent Algorithm for Zigbee (IEEE802.15.4)," NEW2AN 2006, St.Petersburg, Russia, May.2006
- [10] Jae Yeol Ha, et al., "An Enhanced CSMA-CA Algorithm for IEEE802.15.4 LR-WPANS," IEEE COMMUNICATION LETTERS, VOL.11, May 2007
- [11] A.Kamaerman, et al., "Wave LAN : A High performance Wireless LAN for the Unlicensed Band, Bell Labs Technical Journal, pp.118 - 133, 1997

- [12] M.Lacage, et al., "IEEE802.11 rate adaption : A practical approach," INRIA TR-5208, 2004