

# 光信号による端末位置検出と複数 AP の協調による無線 LAN のスループット向上手法の基礎評価

伊藤 達哉<sup>1</sup> 石川 晃平<sup>1</sup> 石原 進<sup>1</sup>

**概要:** Wi-Fi を利用した端末が普及し, 無線 LAN アクセスポイント (AP) が複数利用できる状況が増えている. 複数 AP が存在すると, ある AP に負荷が集中し無線 LAN 全体の利用効率が低下する問題が生じる. そのため負荷分散手法が多数提案されている. しかしほとんどの負荷分散手法では, AP は異なるチャンネルを利用するものとしており, AP 同士の干渉を考慮した負荷分散手法は少ない. 本稿では, 同一チャンネルを用いる AP が高密度に配置された環境を想定し, AP 協調による負荷分散並びに無線 LAN の利用効率向上手法を提案する. 提案手法では, 端末へフレームを送信する際に使用する AP を変更できるように, 複数の AP を集約して制御する装置 (以下, 集約器) を導入する. 集約器は端末の位置情報に基づいて干渉推定を行うことで, 同時通信が可能な AP と端末の組み合わせを推定する. この推定に従い, 同時送信が可能な AP を使用して端末へフレームを送信する. 位置情報の取得には, 可視光通信を用いる. シミュレーションにより, 一般的な無線 LAN と提案手法の比較を行い, 提案手法によって無線 LAN 全体のスループットが向上することを確認した.

## A basic study on improvement of wireless LAN throughput leveraging multiple access points based on location of mobile hosts detected with optical signal

TATSUYA ITO<sup>1</sup> KOHEI ISHIKAWA<sup>1</sup> SUSUMU ISHIHARA<sup>1</sup>

### 1. はじめに

近年, 無線 LAN アクセスポイント (AP) の普及により, 複数 AP で構築された無線 LAN が増加している. 無線 LAN では CSMA/CA を基本とする MAC プロトコルを使用しているため, AP が提供する無線通信資源は接続する移動端末 (以下, 端末) によって共有される. 従って, ある AP に接続する端末が増加するほど, 各端末のスループットは減少してしまう. また, 現在普及している端末の多くは, 受信電波強度等に基づいて接続する AP を決定するため, 同一エリア内で利用可能な AP が複数存在するにもかかわらず, 1 つの AP に接続が集中することで AP 間の負荷が不均一になり, ネットワーク全体のスループットを十分に高くできないという問題が生じる.

複数の AP に負荷が分散するよう制御することで, 無線

LAN 全体のスループットを向上させる方法が研究されている. ネットワーク側が負荷の監視, および端末の接続する AP の変更や帯域制御を行う事で負荷を分散させる手法 [1][2] や, 負荷が分散するよう端末が自律的に接続 AP を選択する手法 [3][4] などが提案されている. これらの手法の多くは, 隣接する AP の使用するチャンネルが異なり, AP 同士あるいは異なる AP を利用する端末同士の電波干渉が発生しない事が前提となっている. ところが, より高い密度で AP が配置される場合, 同一チャンネルを使用する AP どちらの調整が必要である. またこれらの従来手法では, 端末の接続する AP を変更することで負荷分散を行っているが, 通信データの最小単位であるフレーム単位で端末の通信する AP の変更を行えば, より細かい負荷分散制御が行え, さらに効率的な通信が期待できる.

本稿では, ネットワーク側から端末への下り方向のフレームを送信する際に, フレーム送信に使用する AP を宛先端末位置に基づいて適切に変更することで無線 LAN 全

<sup>1</sup> 静岡大学大学院 工学研究科  
Graduate School of Engineering, Shizuoka University

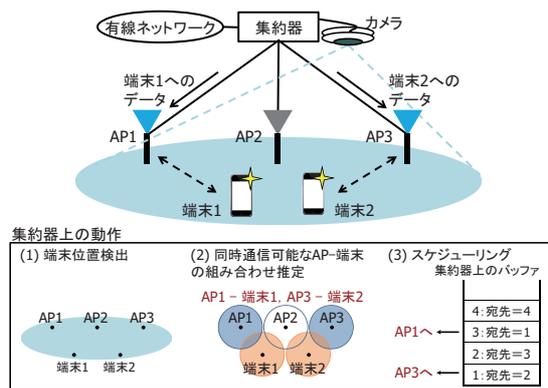


図 1 位置情報利用通信 AP 動的変更システム

体のスループットを向上する手法—位置情報利用通信 AP 動的変更システム—を提案する（図 1）。提案システムでは、端末へフレームを送信する際に使用する AP を変更できるように、複数の AP を集約して制御する装置（以下、集約器）を導入する。集約器は下り方向の端末宛のフレームを端末へ送信する際に、送信に使用する AP を配下の AP の中から選択して使用する。集約器はカメラを、端末は光源を備えており、カメラで端末が発する光を撮影することで集約器は端末の位置を取得する [9]。端末や AP の位置に基づき、干渉が起きない範囲でより多くのフレームを同時に送信することでスループットの向上を図る。以下、第 2 章で関連研究について述べた後、第 3 章では提案する位置情報利用通信 AP 動的変更システムの詳細を述べる。4 章では同システムのシミュレーションによる基礎評価について述べる。5 章でシステムの問題点と改善案について述べ 6 章で、本稿をまとめる。

## 2. 関連研究

IEEE 802.11 無線 LAN では、AP が定期的にビーコンを送信しており、端末はビーコンを受信した際の受信電波強度が高い AP に接続して通信を行う。しかしこの方法では、1 つの AP に多くの接続が集中するという問題がある。無線 LAN では、端末は通信媒体を取り合う形で通信を行うため、1 つの AP で通信を行う端末が増えるほど、その AP に接続した端末のスループットは低下する。複数利用可能な AP が存在するなら、各 AP に端末を分散させて接続させることで、無線 LAN 全体のスループットや各端末のスループットが向上する。

端末が接続する AP を制御する事で、端末のスループットや無線 LAN 全体のスループットを向上させる負荷分散制御の研究が盛んに行われている。Kumar らは文献 [1] で、全ての端末と AP 間の RSSI が与えられた時に無線 LAN 全体のスループットを最大にする端末の接続先 AP の組み合わせを求める最適化問題の定式化を行っている。Bejerano らは文献 [2] で、最小値を最大化する Max-Min 型の公平分配方式を用い端末間の通信品質の公平性を保ちつつ、負荷

分散による無線 LAN 全体のスループット向上を達成する中央制御型のシステムを提案している。この手法では、インフラ側に管理サーバが存在し、各 AP に接続している端末のプライオリティや通信レートの収集、収集したデータを利用した各端末の通信先 AP と通信レートの割当、各端末への命令を行う。しかしながら、このような中央制御を行う方式では、一箇所で全ての制御を行うため負荷が高くなり、大きなネットワークでの利用が難しい。

そこで、端末が自律的に判断して接続する AP を選択する方法が多く提案されている。Gong らは文献 [3] で、端末が AP の送信するビーコンやパケットから通信レートと AP の負荷情報を取得し、接続後の AP の負荷が最も小さい AP を接続先 AP として選択する手法を提案している。Kasbekar らが文献 [4] で提案する手法では、AP は自身に接続している端末の通信レートの合計をビーコンに載せて定期的に送信し、端末はビーコンの受信電波強度と通信レートの合計から接続後に期待されるスループットを推定し、その推定値に基づき接続する AP を選択する。Papaoulakis らの手法 [5] では、AP は 16 段階で表した自身の混雑状況をビーコンに載せて定期的に送信し、端末はビーコンの受信電波強度と AP の混雑度合いに基づき、接続する AP を選択する。Ercetin らは文献 [6] で、端末が AP へ送信したパケットの平均送信遅延を AP の混雑さを表す指標とし、端末はその値に基づき接続する AP を選択する手法を提案している。Du らは [7] で、端末が隠れ端末による影響が少ない AP を選択して接続する手法を提案している。この手法では、AP が自身の通信利用率を各端末に送信し、端末がキャリアセンスによって得られる伝送路の使用率と、実際の AP での伝送路使用率とを比較し、その差を隠れ端末による影響の指標とする。

これらの負荷分散手法の多くが、隣接する AP が異なるチャネルを利用し、AP 同士あるいは異なる AP を使用して通信を行う端末同士は通信時に電波干渉しない事を前提としている。Bonald らは文献 [8] で、文献 [4] での提案手法を改良し、同一チャネルを使用して通信を行う AP が複数存在する場合を想定したシステムを提案している。しかしこの手法では、同一チャネルを使用する複数の AP の内、端末はビーコンを受信した際の受信電波強度の高い AP を選択し接続するとしており、同一チャネル間では負荷分散を行っていない。都市部では高密度で無線 LAN の AP が配置されており、AP 間の電波干渉は容易に起きることが予想できる。そのため、複数 AP の同一チャネル利用を考慮した負荷分散制御が必要である。同一チャネルを用いた効率的負荷分散が可能であれば、これを複数チャネルを用いる場合に拡張することで、さらなる効率化が期待できる。

多くの負荷分散手法は、負荷分散制御のための情報を AP-端末間でやり取りする際、通常のビーコンにデータを付加したり、別途制御用のフレームを使用する。これらの

送信にあたってはデータ通信と同じチャネルを用いるため、電波干渉の原因となる他、制御用トラフィックを増加させ、無線 LAN 全体の利用効率の低下を招く。無線電波通信以外で制御情報のやり取りをすれば、上記の問題の影響を低減できる。

無線電波を使用しない通信方法は様々なものが存在するが、近年では CMOS センサ等のイメージセンサ技術の向上により可視光通信が注目を集めている。制御用情報のやり取りを、無線電波通信に影響のない可視光通信を用いて行うシステムが提案されている。筆者らは、光通信によって取得した端末位置を利用して、スマートアンテナの制御を行って無線 LAN での空間多重性を向上させる手法 Flashing Lights and Smart Antenna assisted mobile communication (FLiSA) [9] を提案している。FLiSA では点滅光源を通信端末に付加し、システム全体を見通せる位置に設置したカメラで撮影した動画画像から点滅光源を検出して通信端末の位置を特定する。この手法では、撮影画像を分割した領域毎の代表値における時間軸上の変化のスペクトルを解析する事で、光源が存在する領域を特定する。本稿では、上記の光通信による端末位置取得手法により取得した端末位置を利用し、同一チャネルを使用する AP 間での負荷分散手法を提案する。

### 3. 位置情報利用通信 AP 動的変更システム

本章ではまず、提案する位置情報利用通信 AP 動的変更システムのスループット向上のための基本戦略を説明する。その後、システム概要を述べ、その重要構成要素である集約器による位置情報に基づいた干渉関係推定と、その結果に基づくフレーム送信スケジューリングの手法について述べる。

#### 3.1 スループット向上基本戦略

Wi-Fi 通信では一般的に、端末は RSSI 等に基づいて最寄りの AP を 1 つ選択し通信を行うため、複数の端末が最寄りの AP として同一のものを選ぶ場合がある(図 2(a))。複数の端末が同一の AP を使用して通信を行う場合、それらの端末は同時に通信を行うことができない。一方で、各端末が最寄り以外の異なる AP を使用して互いに干渉することなく通信できる位置関係にあるならば、同時に通信ができるのでスループットを向上できる(図 2(b))。

2章で述べたように、既存研究ではこのような負荷分散を端末の接続する AP を変更することで行っている。一般的に、端末は 1 つの AP としか接続ができず、一度接続したら他の AP に接続先を変更しない限り、接続した AP を用いて通信を行う。しかし端末の接続する AP を変更するのではなく、通信データの最小単位であるフレームごとに端末の通信する AP の変更を行うことで、刻々と変化するトラフィックに対してその都度最適な負荷分散制御が行え、

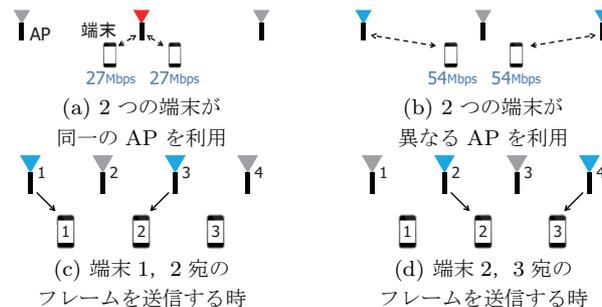


図 2 スループット向上基本戦略

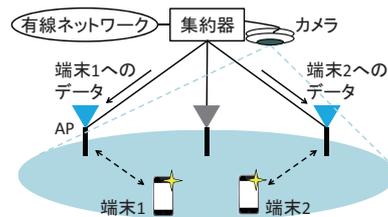


図 3 位置情報に基づく AP 選択システム

より効率的な通信が可能になると考える。例えば、図 2(c)のように端末 1 と端末 2 にフレームを送信する時は AP3 を使用して端末 2 へ送信、図 2(d)のように端末 2 と端末 3 にフレームを送信する時は AP2 を使用して端末 2 へ送信、というようにフレーム単位で送信する AP を変更することで、トラフィックに応じた負荷分散制御が可能となる。

以下、本稿では議論を単純にするため、全ての AP が同じチャネルを使用することを前提とする。

#### 3.2 位置情報利用通信 AP 動的変更システム

上記のスループット向上方法に着目し、下り方向のフレームに対して同時送信が可能な状況を位置情報から判断し、フレーム送信に使用する AP を適切に変更することで無線 LAN 全体のスループットを向上する手法—位置情報利用通信 AP 動的変更システム—を提案する。このシステムのポイントは、以下の通りである。i) 光点滅信号によって、無線電波通信資源を使わないで端末の位置を把握する [9]。ii) 端末の位置、AP の位置、電波の到達範囲の推測に基づいて、互いに干渉しない宛先端末と AP の組み合わせを見つける。iii) 上記 ii) に基づいて、複数の AP から各フレームの送信に使用する AP と送信タイミングを決定する。

##### 3.2.1 システム概要

図 3 に位置情報利用通信 AP 動的変更システムのシステム概要を示す。提案システムでは、複数の AP が集約器を介して有線ネットワークに接続される。有線ネットワークから集約器へ到着する端末宛のフレームは、集約器内の送信バッファに一時的に格納される。集約器は送信バッファから効率よく送信できるフレームの組を選択し、適切な AP を介して端末へ送信する。

集約器はサービス提供エリア全体を見渡せるカメラを備

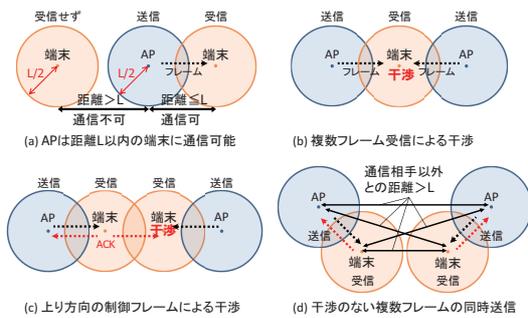


図 4 距離による通信推定と干渉推定

えており、端末に取り付けられた光源が発する光の撮影映像に基づいて端末位置を推定する [9]。集約器は各端末の位置に基づいて、各 AP が通信可能な端末と、複数の AP を利用してフレーム送信を同時に行う場合の干渉関係を推定する。集約器は AP や端末間の干渉を避け、より多くのフレームを同時に送信するように、フレームと AP を選択して送信する。端末の通信方式は IEEE 802.11 DCF を用いることを想定している。

### 3.2.2 位置情報に基づいた通信可否の推定と干渉の推定

集約器は各 AP と通信可能な端末、複数のフレームを同時に端末へ送信した際の干渉関係を、以下のモデルを用いて推定する。

あるノードがフレームを送信した際、その位置から通信可能最大距離  $L$  以内に存在するノードはそのフレームを受信する (図 4(a))。Wi-Fi では AP と端末の送信電力がほぼ同じであるため、本稿ではどちらがフレームを送信する場合でも  $L$  の値は同じであると仮定する。あるノードがフレームを受信中に、他のノードが送信する信号が到達した場合、得べきフレームを正しく復号できない (図 4(b))。また、送信ノードが受信ノードへフレームを送る過程で受信ノードが送信ノードへ ACK の送信を行うため、ACK も干渉を引き起こす (図 4(c))。正しく通信を行うためには、送信ノードが ACK を正しく受信する必要がある。従って、AP から端末への通信に注目すると、AP から端末へのフレーム送信と、それに対する端末から AP への ACK 送信に対して、干渉が起きなければ同時に複数のフレーム送信が可能となる (図 4(d))。またその逆の、端末から AP への通信も同様である。

集約器はこのモデルに従い、ある端末と AP 間の通信において、端末と AP の各位置から距離  $L$  以内に通信相手以外の通信端末か通信 AP が存在する場合、干渉が発生すると推定する。集約器は、干渉が発生しない組み合わせを、同時通信が可能と判断する。

### 3.2.3 フレーム送信スケジューリング

スケジューラはフレームとそれに対する ACK 両方が干渉せず通信できるように、送信フレームと送信に使用する AP をスケジュールする。実際には端末側から AP 方向への通信 (上り) が発生するが、本稿ではまず実現の容易な

AP から端末への通信 (下り) のみの場合について議論する。5章で上りの通信を含む場合の実現手法について考察する。集約器は、接続された全ての AP のフレーム送信が終了すると、前述した干渉推定処理を行い、同時に送信しても干渉しない複数のフレームを、後述のアルゴリズムに従って選択される AP へ転送する。送信したフレーム全てが、AP から端末へ送信されると、集約器は再度フレームを選び AP へ送信する。ACK が帰って来なかったフレームは未送信フレームと同じ条件で再度送信される。

### 3.2.4 送信フレーム・送信 AP 選択アルゴリズム

集約器上のバッファから送信フレームを選択する方針としてまず考えられるのは、到着した順序で送信フレームを選択し端末へ送信していく方法である。しかし、必ずしも干渉せずに同時に送信できるフレームが連続して到着するとは限らない。そこで、より高いスループットを得るために、到着順序を無視してより多くのフレームが同時に送信できるようなフレームを優先的に選択するアルゴリズムを考える。しかし、この方法では同時送信が困難な位置に存在する端末を宛先として持つフレームが、いつまでも送信されずにバッファに残ってしまう恐れがある。そのため、最も早く到着したフレームの到着時刻から一定時間内に到着したフレームを送信候補とし、その候補の中で到着順序を無視したアルゴリズムによって送信フレームを選択することで、この問題を回避する。以後この一定時間を、送信候補選択期間と呼ぶ。

以下、送信フレームの選択アルゴリズムとして、まず、フレームの集約への到着順序に基づいて送信フレームを選択する基本的なアルゴリズムを示す。その後、そのアルゴリズムをベースとして、宛先端末の位置関係をフレーム選択に利用するよう改良した改良アルゴリズムを示す。

#### 到着順序優先法

到着順序優先法は、集約器のバッファに到着した順序が早いフレームを優先的に同時送信用のフレームとして選択するアルゴリズムである。

(1) 全ての送信候補フレームを集合  $S$  に、全ての AP を利用可能 AP 集合  $T$  に、送信候補フレームの全ての宛先端末を集合  $U$  に含める。(2) 集合  $S$  内のフレームで、最も到着時刻が早いフレームを送信フレームとして選択する。(3) 集合  $T$  内の AP のうち、選択したフレームの宛先位置に最も近い AP へ、選択したフレームを割り当てる。(4) 送信フレームの宛先端末と割り当てた AP の各位置から距離  $L$  以内に存在する AP と端末をそれぞれ集合  $T$  と  $U$  から除外する。(5) 集合  $U$  内の端末のうち、距離  $L$  以内に集合  $T$  内の AP が 1 つも存在していない (通信できる AP が存在しない) 端末を、集合  $U$  から除外する。(6) 集合  $U$  内に宛先端末が存在しないフレームを集合  $S$  から除外する。(7) 候補となる AP かフレームが無くなるまで (2)~(6) を繰り返す。

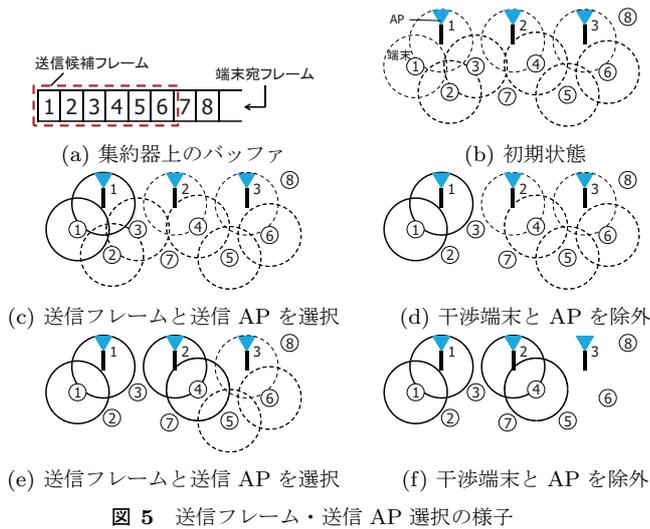


図 5 送信フレーム・送信 AP 選択の様子

具体例を図 5 に示す。集約器のバッファ上に端末宛のフレームが図 5(a) のように存在するとする。また宛先端末と AP の位置関係を図 5(b) とする。同図では、端末の数字は集約器上のバッファに存在するフレームの番号と同じになっている。また、各端末と AP を中心にして半径  $L/2$  の円が破線で描かれている。この破線は、送信候補フレームの宛先端末の集合  $U$  と利用可能 AP 集合  $T$  に含まれるノードに対して描かれている。

まず、最も到着時刻の早いフレーム 1 が選択され、その宛先 (端末 1) から最も近い AP1 が送信に使用する AP として選択される (図 5(c))。同図においては、選択された端末および AP に関しては通信範囲を示す円を実線で描いている。次に、フレーム 1 の送受信に関わる端末・AP に対して干渉する端末と AP をそれぞれ集合  $U$  と  $T$  から除外する (図 5(d))。この例では、まだ候補となるフレームあるいは AP が存在するので次のサイクルへ移る。除外されていないフレームの内、最も到着時刻の早いフレーム 4 が選択され、集合  $T$  内の AP のうち、最もその宛先 (端末 4) に近い AP2 が送信に使用する AP として選択される (図 5(e))。同様に、選択済みの端末・AP に対して干渉する端末と AP を集合  $U$  と  $T$  から除外する (図 5(f))。端末 6 は通信可能な AP が存在しないため集合  $U$  から除外されている。この時点で、選択候補となる端末あるいは AP が存在しない状況となる。従って、ここでアルゴリズムは終了し、選択した AP を使用して端末へフレームが送信される。

### 近隣端末優先法

近隣端末優先法は、宛先端末間の距離に着目したアルゴリズムである。このアルゴリズムでは、通信が干渉しない範囲で宛先端末間の距離が短くなるよう送信フレームを選択する。こうすることで、同時に通信する端末・AP の組の地理的な密度を高くできる。

近隣端末優先法のアルゴリズムは、到着順序優先法の

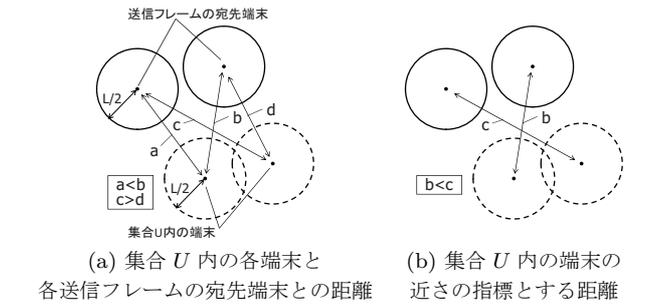


図 6 近隣端末優先法によるフレーム選択の際の宛先端末の位置関係

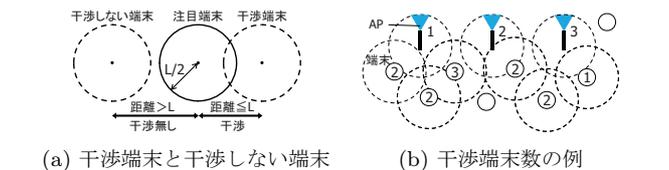


図 7 多干渉端末優先法における干渉端末の定義と干渉端末数の例

(2) を下記のように変更したものである。送信フレームが 1 つも選択されていない場合 (1 つ目のフレームを選択する時) は、集合  $S$  内から最も到着時刻が早いフレームを送信フレームとして選択する。送信フレームが 1 つ選択されている場合は、集合  $U$  内からその送信フレームの宛先端末に最も近い端末を見つけ、見つけた端末を宛先端末として持つフレームを送信フレームとして選択する。送信フレームが 2 つ以上選択されている場合は、まず、集合  $U$  内の各端末と全ての送信フレームの宛先端末間の距離を計算する (図 6(a))。そして、集合  $U$  内の各端末に注目し、送信フレームの各宛先端末との距離のうち最も大きい距離を注目した端末の近さの指標とする (図 6(b))。集合  $U$  内の端末のうち、最も近さの指標が小さい端末を宛先端末として持つフレームを送信フレームとして選択する。距離が同じ値の場合は、到着時刻が早いフレームを選択する。

### 多干渉端末優先法

多干渉端末優先法は、各宛先端末同士の干渉関係に着目したアルゴリズムである。このアルゴリズムでは、端末同士での干渉が生じやすく同時送信が困難な位置関係にある端末宛のフレームを優先的に送信し、より同時送信しやすいフレームを残すようにすることで、平均的な同時送信フレーム数の増加を狙っている。

注目する端末の通信可能範囲内に存在する端末を干渉端末と定義し (図 7(a))、その干渉端末の数 (以下、干渉端末数) を同時送信の困難さの指標とする。端末の位置関係が図 5(b) の時の各端末における干渉端末数を図 7(b) に示す。同図では端末上に示した数字がその端末に注目した時の干渉端末数を表している。多干渉端末優先法では、アルゴリズムの最初に、各端末の干渉端末数を計算する。その後の動作は送信順序優先法の (2) を「集合  $S$  内のフレームで、集合  $U$  内の端末のうち最も干渉端末が多い端末を宛先として持つフレームを選択する」に変更したものに従う。

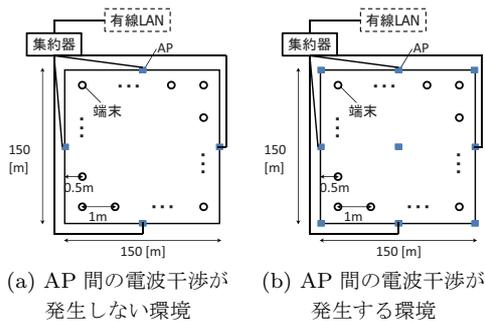


図 8 シミュレーション環境

## 4. シミュレーション評価

提案手法を用いる場合と、用いない場合について、簡易的なシミュレータによるシミュレーションを行い、3章で述べた3種類の送信フレーム・送信AP選択アルゴリズムについて、スループットの向上効果を評価した。

### 4.1 シミュレータ

シミュレーションには自作のシミュレータを用いた。本研究では無線LANのMACプロトコルには原則としてCSMA/CAに基づくIEEE 802.11 DCFが用いられるものと仮定しているが、本評価では、簡易的にCSMAにバックオフアルゴリズムを用いない単純な干渉回避を付与したものをMACプロトコルに用いた。このシミュレーションではCSMA/CAと異なり、端末位置関係に基づく制御によって、フレーム同時送信によるフレーム衝突を回避している。隠れ端末や同時送信による衝突は、端末の位置関係に基づき同時送信を行わないように、一方の送信者の送信を延期することで回避する。APは、自身に到着したフレームを送信バッファに保存し、到着した順に宛先端末への送信を試みる。APは送信フレームとそれに対するACK両方が干渉せず通信できる場合にフレームの送信を行う。各APはシステム内の他の通信中のAPや端末の位置に基づいて、前述した通信モデルを用いて干渉の有無を判定する。複数のAPが同時に送信を開始すると干渉する可能性があるが、そのような場合は送信フレームの到着時刻が早いAPが優先して通信を行い、その他の送信を延期することで干渉は回避される。APはフレーム送信が終了すると、ACK受信の有無に関わらず次のフレーム送信を試みる。

### 4.2 シミュレーションシナリオ

提案手法を用いる場合と、用いない一般的な場合について、APの配置数が異なる2種類の環境を用いてシミュレーションを行った。

#### 4.2.1 提案手法を用いる場合

150m × 150mの正方形の部屋に1m間隔で格子状に端末を配置した環境で、APの配置が異なる2種類の設定を用意した。1つ目の設定では、APの設置密度が低くAP間

の電波干渉が発生しない環境を想定し、部屋の各壁の中央にAPを計4台(図8(a))設置する。2つ目の設定では、APの設置密度が高くAP間の電波干渉が発生する環境を想定し、部屋の各壁の中央、さらに部屋の四隅と中央にAPを計9台(図8(b))設置する。全てのAPは集約器を通して有線LANに接続される。通信可能最大距離 $L$ を100m、AP・端末間の通信レートを距離によらず54Mbps固定とする。有線LANから端末宛の1500bytesのフレームをポアソン到着に従って10万個送信する。各フレームの宛先は部屋に設置された端末の中からランダムに選択される。

#### 4.2.2 提案手法を用いない場合

提案手法を用いない場合を想定したシミュレーションでは、APは集約器を通してではなく直接有線LANに接続される。有線LANから送信されるフレームは、各フレームの宛先端末から最も近いAPへ送信される。そのほかは提案手法を用いる場合と同様である。

### 4.3 シミュレーションの結果と考察

フレーム平均発生間隔、送信候補選択期間を変化させ、全フレームが端末へ送信されるまでシミュレーションを行った。4台のAPが同時に通信を行った場合に達成する速度である216Mbpsでフレームが発生する場合をシステム負荷の最大とし、システム負荷が54Mbpsから216Mbpsとなるようにフレーム平均発生間隔を設定した。また送信候補選択期間は1msから5msの間で変更した。

#### 4.3.1 APの設置密度が低くAP間干渉が発生しない環境

各アルゴリズムにおける平均スループットを図9に示す。 $d$ は送信候補選択期間の長さを表している。提案手法を用いない場合を集約器無しとし、提案手法を用いた場合は各アルゴリズム名で示している。全てのアルゴリズムにおいて送信候補選択期間が大きくなるにつれて、平均スループットが高くなっている。これは提案手法によって、フレームの同時送信の機会が増したためと考えられる。どのアルゴリズムにおいても、送信候補選択期間を大きくしていくと、平均スループットが最大値に収束する。システム負荷が高い時ほど、送信候補選択期間がより小さい値で収束する。これはシステム負荷が高い時ほど、送信候補となるフレーム数が大きくなるため、同時送信の機会が増したためと考えられる。

送信候補選択期間が5msの時の各アルゴリズムにおける平均スループットを比較してみると、近隣端末優先法を用いた場合が最も平均スループットが高い(図10(a))。しかし、各アルゴリズムの平均スループットに大きな差は見られない。集約器無しに比べて、提案手法を用いることで、最大20Mbps程度平均スループットが向上した。

次に各フレームが送信された時刻から端末に受信されるまでの時間(=送信遅延)の累積分布(CDF)を図10(b), (c)に示す。提案手法を用いた場合のほうが、全体的に送

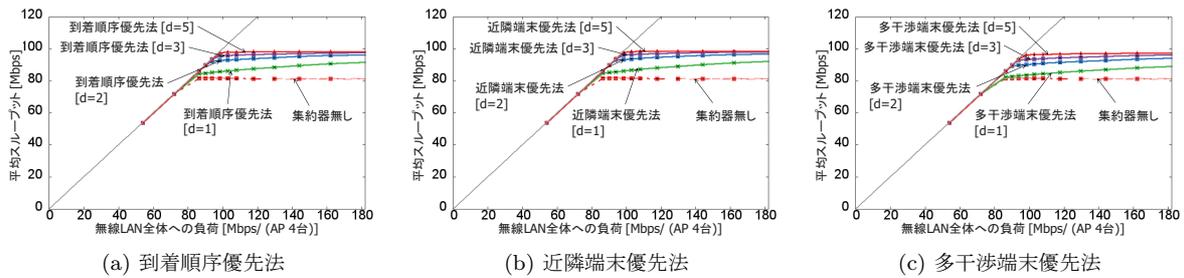


図 9 各アルゴリズム別平均スループット (設置 AP4 台)

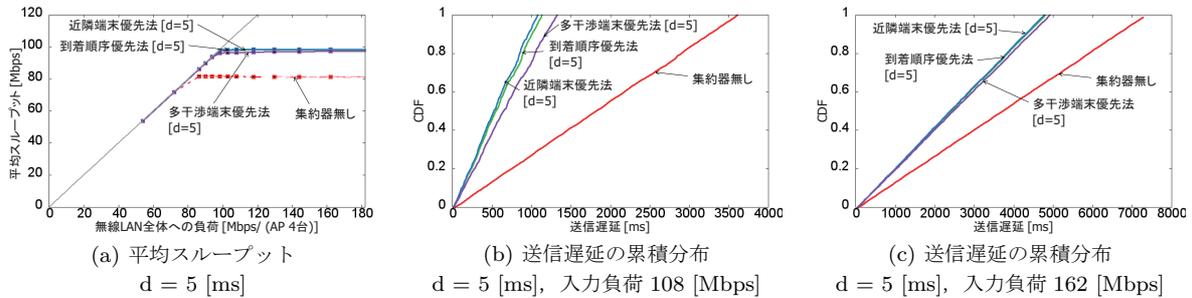


図 10 平均スループットと送信遅延の累積分布 (設置 AP4 台)

信遅延が小さい値で分布しており、中でも近隣端末優先法を用いた場合が最も遅延が少なくなった。

#### 4.3.2 AP の設置密度が高く AP 間干渉が発生する環境

各アルゴリズム別の平均スループットと入力負荷の関係を図 11 に示す。各アルゴリズムにおいて送信候補選択期間を大きくするほど、平均スループットが向上している。近隣端末優先法を用いた場合では、送信候補選択期間が 5ms 程度でも平均スループットが収束していないため、送信候補選択期間を大きな値にすることでスループットが向上すると予想される。送信候補選択期間が 5ms の時の、各アルゴリズムにおける平均スループットを比較してみると、近隣端末優先法を用いた場合が最も平均スループットが高い (図 12(a))。

送信遅延の累積分布 (CDF) を図 12(b), (c) に示す。各アルゴリズムを比較すると、近隣端末優先法を用いた場合の送信遅延の分布が、他と比べ最も小さい値に分布していることがわかる。AP の設置密度が低い環境と比較すると、AP の設置密度が高い方が、近隣端末優先法において同じ入力負荷の時に高いスループットを得ている。それに対し、他のアルゴリズムではほとんどスループットが向上していない。これは、AP の設置密度を高くしたことで、同時通信端末の地理的密度をさらに高くできるようになり、近隣端末優先法の効果が高まったためと考えられる。

## 5. 課題

本稿では議論を単純にするため、様々な仮定をした上で手法の提案と評価を行った。それら仮定を取り除き現実に近い環境を想定すると、提案手法では様々な問題が生じる。本章では、提案手法を現実的な環境で利用するための課題を述べる。

### 5.1 異なる通信レートによる通信利用率の低下

本稿では、端末-AP 間の通信レートが一定という前提で議論したが、実際は端末の位置や環境によって通信レートが異なる。提案手法では、一回のスケジュールで各 AP に最大 1 つのフレームが割り当てられる。各端末-AP 間の通信レートが異なる場合、一回のスケジュールにおいて、通信レートの高い AP は通信が早く終了し、通信レートの低い AP の通信が終了するまで何もせず待機する。この待機時間によって通信利用率が低下してしまう。そのため、通信レートを考慮したスケジューリング手法が必要である。

### 5.2 バックオフによるスケジュールのずれ

本システムは、既存端末でも使用可能とするため、システムで使用する AP の通信方式は CSMA/CA としている。CSMA/CA では、通信したい端末や AP はキャリアセンスを行い、他に通信者が存在しない場合ランダム時間待ち (バックオフ)、その間も通信する他者が存在しなければ通信を開始する。集約器が同時に送信したフレームが複数の AP に同時に到着しても、バックオフは各 AP がランダムに設定するため、フレームを同時に受け取った複数の AP が同時に送信を開始するとは限らない。簡単な解決法としては、集約器の配下の AP のランダムな待ち時間を、AP 間で同一の値にする方法が考えられる。しかし、無線 LAN 全体のスループット低下や通信端末の公平性が保たれない恐れがあるため、それらを考慮した対策が必要である。

### 5.3 上りトラフィックによるスケジュールのずれ

本システムは下り方向のみのトラフィックが発生する状況を想定しているが、上り方向のトラフィックが発生した場合、その通信によって AP の下り方向のフレーム送信が

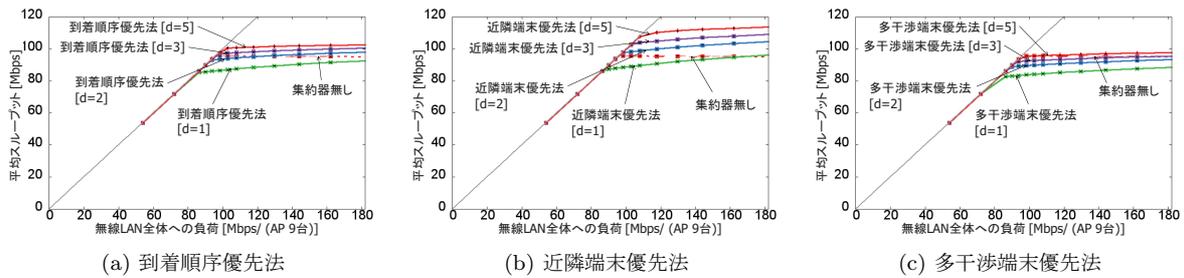


図 11 各アルゴリズム別平均スループット (設置 AP9 台)

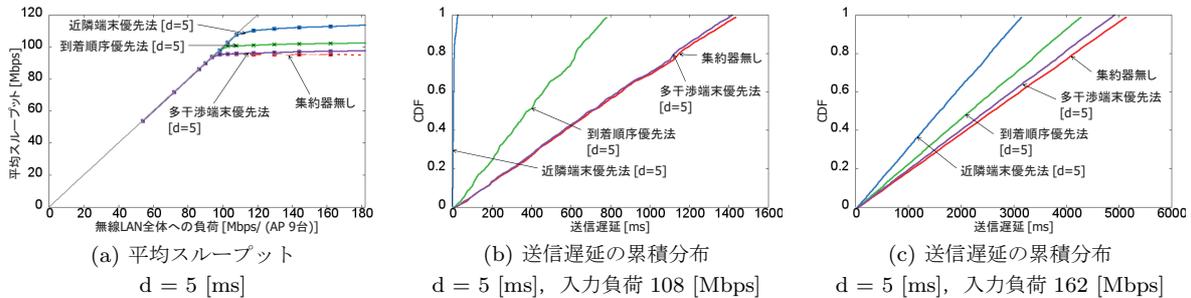


図 12 平均スループットと送信遅延の累積分布 (設置 AP9 台)

スケジュールした時刻より遅れる場合がある。そのような場合、同時に送信されるはずのフレームがずれて送信される。そのような現象が発生した場合に、集約器が柔軟にフレームのスケジュールを変更するような機構が必要である。

## 6. まとめ

本稿では、光信号を利用した端末位置検出と複数 AP の協調によって無線 LAN 全体のスループットを向上するシステム、位置情報利用通信 AP 動的変更システムを提案した。本システムは、i) 光点滅信号によって、無線電波通信資源を使わないで端末の位置を把握 [9], ii) 端末の位置、AP の位置、電波の到達範囲の推測に基づいて、互いに干渉しない宛先端末と AP の組み合わせの発見, iii) 上記 ii) に基づいて、複数の AP から各フレームの送信に使用する AP と送信タイミングの決定を行う。提案手法の評価を簡易的なシミュレーション結果に基づいて行い、単一チャネルを使用する複数の AP が存在し、下りのトラフィックのみが存在する状況において、各端末が最も近い AP を選択する一般的な無線 LAN と比べ平均スループットが高くなることを確認できた。提案手法では、いくつかのフレームスケジューリングアルゴリズムを考案したが、そのうち同時通信端末の地理的密度を高くするようにスケジューリングを行うアルゴリズムが最も高いスループットを得た。同一チャネルを使用する AP が高密度に設置され AP 間干渉が多発するような環境でも、提案手法では高いスループットを得ることが期待できる。

今後は上りトラフィックの発生を考慮し再送処理やフレーム送信処理をより柔軟に行えるよう改善する必要がある。また高精度なネットワークシミュレータによるシミュレーション評価が必要である。

## 謝辞

本研究は、科学研究費補助金基盤研究 A「超多端末モバイルを支える無線資源極限利用アーキテクチャの実証的基礎研究 (課題番号 24240009)」の助成によるものである。ここに記して謝意を示す。

## 参考文献

- [1] Kumar, A., Kumar, V.: Optimal Association of Stations and APs in an IEEE 802.11 WLAN, *Proc. NCC*, pp.1-5 (2005).
- [2] Bejerano, Y., Han, S. J., Li, L. E.: Fairness and Load Balancing in Wireless LANs Using Associatino Control, *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, vol.15, No. 3, pp.560-573 (2007).
- [3] Gong, H., Nahm, K., Kim, J. W.: Distributed Fair Access Point Selection for Multi-Rate IEEE 802.11 WLANs, *Proc. CCNC 2008*, pp.528-532 (2008).
- [4] Kasbekar, G. S., Nuggehalli, P., Kuri, J.: Online Client-AP Association in WLANs, *Proc. WiOPT 2006*, pp.1-8 (2006).
- [5] Papaoulakis, N., Patrikakis, C. Z.: A Proactive, Terminal Based Best Access Point Selection Mechanism for Wireless LANs, *Proc. IEEE GLOBECOM Workshops*, pp.1-4 (2008).
- [6] Ercetin, O.: Association games in IEEE 802.11 wireless local area networks, *IEEE Wireless Communications*, vol.7, No. 12, pp.5136-5143 (2008).
- [7] Du, L., Bai, Y., Chen, L.: Access Point Selection Strategy for Large-Scale Wireless Local Area Networks, *Proc. WCNC*, pp.2161-2166 (2007).
- [8] Bonald, T., Ibrahim, A., Roberts, J.: The impact of association on the capacity of WLANs, *Proc. WiOPT 2009*, pp.1-10 (2009).
- [9] 石川晃平, 石原進: 点滅光を利用した指向性無線通信システムのための点滅光源検出手法の基礎評価, *DICOMO2012 シンポジウム論文集*, pp. 1986-1994 (2012).