

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 1 日現在

機関番号：14603  
 研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2011～2012  
 課題番号：23700099  
 研究課題名（和文）アクセスポイント間の動的負荷分散を実現する無線 LAN インタフェース仮想化方式  
 研究課題名（英文）Virtualization Method of Wireless LAN Interfaces for Dynamic Load Balancing among Multiple Access Points  
 研究代表者  
 玉井 森彦（TAMAI MORIHIKO）  
 奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・助教  
 研究者番号：90523077

研究成果の概要（和文）：本研究では、無線 LAN 環境において、仮想化された無線ネットワークインターフェース（WNIC）を用いることで、ハンドオーバーによるオーバーヘッドを可能な限り小さくし、トラフィックの変化に対して動的にアソシエーションを更新することで、アクセスポイント（AP）間の負荷分散を実現する方式を提案する。

研究成果の概要（英文）：In this research, we propose a method, which dynamically adapts association topology to the traffic variation, for dynamic load balancing among multiple access points (APs) in wireless LANs (WLANs), while keeping the handover overhead negligible using virtualized wireless network interfaces (WNICs).

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	1,600,000	480,000	2,080,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学，計算機システム・ネットワーク

キーワード：無線 LAN，仮想化インタフェース，負荷分散

## 1. 研究開始当初の背景

無線 LAN ネットワーク（WLAN）の普及に伴い、オフィス、大学、公共施設など多くの場所で大規模な WLAN が敷設されるようになった。WLAN では、多くのデバイス（ノート PC、スマートフォン、ゲーム機、タブレット等）が各アクセスポイント（AP）の限られた資源を共有する。このとき、各端末と各 AP 間の接続関係（トポロジ）について、特定の AP に多数の端末が接続したり、またはトラフィックが集中することで、AP 間で負荷の不均衡が生じる場合がある。このような負荷の偏りは、特定の端末のスループットが極端に低下したり、特定の AP の資源が有効活用されないという問題を引き起こす。

WLAN における AP 間の負荷分散方式につ

いて、盛んに研究が行なわれている。多くの既存研究では、トポロジの更新を、新規端末が WLAN に参加する際か、もしくは一定の周期に従って行う。しかし、WLAN のトラフィックは、様々な要因（各端末の位置や使用帯域量など）により刻一刻と変化する。そのため多くの既存方式では、AP 間の負荷に偏りが生じて、それに対して長時間対応できないままになってしまうという問題が生じる。

周期的にトポロジを更新する場合、周期が長ければトラフィックの変動に対し追従が遅れてしまう。一方、トポロジを更新するためには、端末の接続先 AP を切り替える必要があり、それには制御メッセージの交換などで数百ミリ秒のオーダの遅延が発生する。そのため、周期を短くするとオーバーヘッドが

大きくなり、スループットの低下をまねく可能性がある。

このように、周期的にトポロジの更新を行う方式では、適切な周期の設定が難しいという問題があった。動的負荷分散の実現に向け、より柔軟にトポロジの更新タイミングを導出する方式の考案が望まれる。

## 2. 研究の目的

この問題を解決するため、本研究では、無線ネットワークインタフェース (WNIC) の仮想化方式を利用した、トリガ駆動に基づく AP 間の負荷分散方式を提案する。提案方式では、トポロジの更新に伴うオーバーヘッドをできるだけ小さくするため、端末の物理 WNIC を仮想化して複数の WNIC に見せかけることで、端末を複数の AP へ同時接続させ、AP を切り替える際の制御メッセージの交換を不要にする。その上で、有線ネットワーク上のコントローラにより WLAN のモニタリングを行い、AP 間の負荷に偏りが生じたと判断された場合には、トポロジを即座に更新して AP 間の負荷を均等化する。

提案手法の有効性について、ネットワークシミュレータ (ns-3) を用いて既存方式との比較による評価を行い、集約スループットや端末間の公平性の観点で、提案方式がより優れた性能を達成可能であることを示す。

## 3. 研究の方法

トラヒックの変化にすばやく追従するためには、頻繁にトポロジを更新することが求められるが、それを実現するためには、端末の接続先 AP の切り替えによるオーバーヘッドを削減する必要がある。そこで、まず、IEEE802.11 におけるハンドオーバー手順とオーバーヘッドの原因について説明する。次に、そのオーバーヘッドを削減するための、WNIC の仮想化方式について述べる。

### (1) IEEE802.11 におけるハンドオーバーのオーバーヘッド

IEEE 802.11 でのハンドオーバーには、いくつかの制御メッセージの交換を必要とする。まず、端末は現在の AP に対する接続を解除するためのメッセージを交換する。次にチャネルスキャンを行い、近隣の AP を探索する。これには、端末が probe request を送信し、AP がそれに probe response で答えるアクティブスキャンか、もしくは AP が定期送信する beacon を端末が受信するパッシブスキャンが用いられる。チャネルスキャンは、全て

の利用可能チャネルに渡って行われるため、大きなオーバーヘッドとなる。その後、端末は切り替え先 AP に対し認証と接続のためのメッセージの交換を行う。

Mishra らにより、上記の手順で要する時間について 802.11b での調査が行われており、最大で 500 ミリ秒程度必要であったと報告されている。このオーバーヘッドを削減するための、高速ハンドオーバー方式を提案する研究も行われているが、認証や再接続処理に伴うオーバーヘッドまで削減することは難しい。

別のアプローチとして、複数の WNIC を用いる MultiScan と呼ばれる方式が Brik らにより提案されている。この方式では、端末は 2 つの物理 WNIC を搭載し、一方をプライマリ、もう一方をセカンダリとして用いる。プライマリが接続する AP とはデータの送受信を行う。一方セカンダリでは、別の接続先 AP の候補をバックグラウンドで探索する。もし条件のよい新たな AP を発見した場合、セカンダリが新規 AP と接続した後、プライマリとセカンダリの役割を交換する。これにより、AP の切り替えに伴う制御メッセージの交換が不要となる。しかし、物理 WNIC を複数搭載することによりコストや消費電力が増加するため、現実的には利用が困難である。

### (2) WNIC の仮想化方式

物理的に複数の WNIC を搭載するのと同様の効果を単一の WNIC で実現するため、近年、WNIC の仮想化方式が提案されている。Chandra らは、1 つの WNIC を仮想化し、物理 WNIC 上でステーションモードと AP モードを同時に稼働する方式を提案した。この方式は、現在 Windows 7 に搭載されている。Kandula らは、仮想化 WNIC を用いて、複数の AP と同時接続を行ない、近隣 AP の有線側のバックホール帯域を集約する方式を提案している。

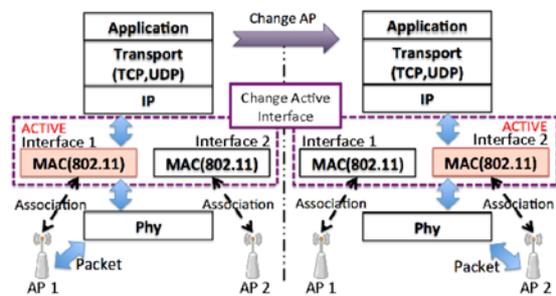


図 1 仮想化 WNIC を用いた AP 切り替えの様子

図 1 に、端末のネットワークスタック上での仮想化 WNIC の動作の様子を示す。各仮想

化 WNIC は、各々異なる AP に対し接続を完了し、既に通信が可能な状態となっている。MAC 層では、各 AP 毎に個別に状態管理を行う必要があるため、各仮想化 WNIC に対応して個別の MAC 層が割り当てられる。物理 WNIC は一つだけであるため、ある時点で通信可能な AP は一つのみである。現在通信を行っている AP へ接続する仮想化 WNIC をアクティブインタフェースと呼び、アクティブインタフェースの接続先 AP をアクティブ AP と呼ぶ。また、アクティブインタフェース以外の仮想化 WNIC をアイドルインタフェースと呼ぶ。各アイドルインタフェースは AP へ接続済みであるため、アクティブインタフェースの切り替えに際して、前で述べたオーバーヘッドなしにアクティブ AP の切り替えが行える。なお、チャンネル変更を必要とする場合でも、アクティブインタフェースの切り替えは、3m 秒程度で実現可能である。

本研究では、仮想化 WNIC の実現についてはこれら既存方式をそのまま用いて実現するものとする。

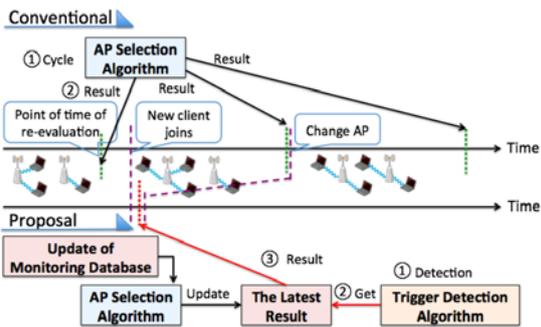


図 2 トリガ駆動に基づくトポロジ更新方式（下部）と周期的なトポロジ更新方式（上部）との違い

### (3) トリガ駆動に基づくトポロジの更新

図 2 の上部に、既存方式（トポロジの更新を周期的に行う方式）でのトポロジの更新タイミングを示す。既存方式では、端末の参加に伴い AP 間の負荷に偏りが生じた場合、次の更新タイミングまで待たなければトポロジが更新されず、その間端末のスループットが低下する可能性がある。

一方提案方式では、図 2 の下部に示すような構成に従い、トリガ駆動に基づくトポロジの更新を実現する。提案方式では、WLAN 環境のモニタリングの結果に基づき常にトラフィックの変化を監視しておき、トラフィックに一定量の変化が生じた場合、すぐにトポロジの更新を実行する。トラフィックの変化に対し、トポロジの更新を発動するためのアルゴリズム

をトリガアルゴリズムと呼ぶ。

提案方式では、AP 選択アルゴリズムとして実際にどの方式を採用するかについて、無線 LAN 網の管理者が、ネットワークの特性やポリシーに従い、様々な方式から自由に選べるようにするため、トリガアルゴリズムと AP 選択アルゴリズムがそれぞれ独立に並行して動作するというアーキテクチャを採用した。AP 選択アルゴリズムでは、モニタリングデータベースの更新があった際に、逐次最新のモニタリング結果に基づき最適なトポロジを計算し、その結果を保持しておく。一方トリガアルゴリズムでは、モニタリングの結果に基づき、一定量のトラフィックの変化があった際に、AP 選択アルゴリズムの最新の出力結果を参照し、そのトポロジをネットワークへ反映させる。

トリガアルゴリズムでは、トラフィックの変化による AP の負荷への影響をとらえるため、各 AP と通信する端末の使用帯域と、AP が端末との通信において使用する伝送レートに着目し、それらの値を次のように利用してトリガを発動させる。

対象の無線 LAN 網における端末の数を  $N$  とし、AP の数を  $M$  とする。ある AP  $j$  (ただし、 $0 \leq j \leq M$ ) をアクティブ AP とする端末の数を  $N_j$  とする。AP  $j$  で計測される端末  $i$  (ただし、 $0 \leq i \leq N_j$ ) の使用帯域を  $TrafficRate(j,i)$  とする。また端末  $i$  が、AP  $j$  と通信する際に使用する伝送レートを  $TxRate(j,i)$  とする。さらに、AP  $j$  をアクティブ AP とする全端末の内、 $j$  との通信で使用されている伝送レートの最小値を  $TxRate_{min}(j)$  とする。トリガアルゴリズムでは、以下の 2 つのスコアを各 AP  $j$  に対し計算する。

$$S(j) = \sum_{i=1}^{N_j} \frac{TrafficRate(j,i)}{TxRate(j,i)},$$

$$S_{min}(j) = \sum_{i=1}^{N_j} \frac{TrafficRate(j,i)}{TxRate_{min}(j)}.$$

上の式は、AP  $j$  をアクティブ AP とする全ての端末の帯域使用率の合計を表す。低い伝送レートをを用いる端末が、高い伝送レートを持つ端末に対して悪影響を与えることを考慮し、低い伝送レートで通信する端末は、AP に対しより大きな負荷を与えるものと考えられる。また、AP  $j$  が提供できる総帯域量は、 $TxRate_{min}(j)$  の値が小さくなるにつれ減少する。そのため下の式では、 $TxRate_{min}(j)$  を用いて計算した場合の帯域使用率により、AP  $j$  の負荷を表す。

以上のスコアを用いて、ネットワーク状況

の変化を検知するため、現在のスコアと前回計測したスコアを比較する。前回トリガが発動した際に計測された  $S(j)$  を  $S^{prev}(j)$ 、同様に  $S_{min}(j)$  を  $S_{min}^{prev}(j)$  と表記する。

もし  $S_{min}^{prev}(j) < S(j)$  となれば、AP  $j$  の負荷が増加したと判断してトリガを発動させる。一方で  $S^{prev}(j) > S_{min}(j)$  となれば、AP  $j$  の負荷が減少したと判断して、この場合もトリガを発動させる。

#### 4. 研究成果

提案方式の評価のため、集約スループットと端末間のスループットの公平性に関して、各クライアントが最も高い RSSI の AP へ接続する方式（レガシ方式）と、MLT 方式との計算機シミュレーションによる比較を行った結果について述べる。

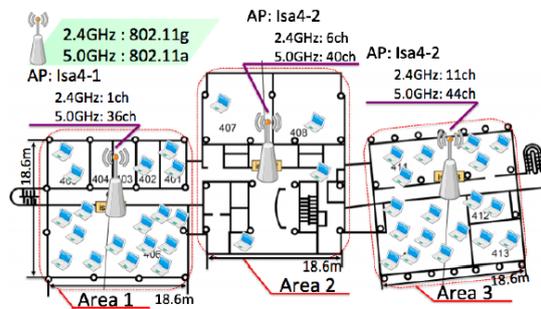


図3 想定フィールドと各 AP および端末の設定と配置

シミュレーションの対象フィールドとして、図3に示すように奈良先端科学技術大学院大学の情報科学研究科 A 棟 4F を想定した。対象フィールドでは、エリア1およびエリア3が研究室、エリア2が共有スペースである。

エリア1および3には、端末を各々18台ランダムに配置し、エリア2には4台の端末をランダムに配置した。エリア1および3は研究室であり、エリア2よりも多めに端末が存在するものとした。各 AP の動作モード、およびチャンネルは、図3に示すように 802.11a/g を混在して利用する環境を想定して設定した。なおパロスモデルの構築には、壁による減衰の影響を考慮するため、各地点のパロスデータを商用のシミュレータである Scenargie に搭載されている物理シミュレータによって求め、そのデータを利用した。

トラヒックフローのモデルとして、常にトラヒックが流れるモデルと、断続的にトラヒックが流れる ON/OFF フローモデルの2つを用いた。ON/OFF フローモデルを利用する端末を ON/OFF フロークライアントと呼ぶ、トラヒックが流れる ON 期間は5秒、一方 OFF 期

間は平均5秒の指数分布に従い生成した。ON/OFF フローモデルは、断続的にトラヒックを発生させる Web ブラウジングによるトラヒックをモデル化することを意図している。提案方式では、ネットワーク全体を管理するコントローラが必要なため、それを有線ネットワーク上に設置した。

提案方式に対する比較方式として、レガシ方式と MLT 方式を用いた。レガシ方式では、RSSI の最も大きい AP へ接続した後、その AP を使用し続ける。MLT 方式では、各 AP の接続端末数と RSSI に基づく期待スループットを求め、その値が最大の AP へ接続する。MLT 方式では、トポロジの更新周期として、3秒と10秒を用いた。

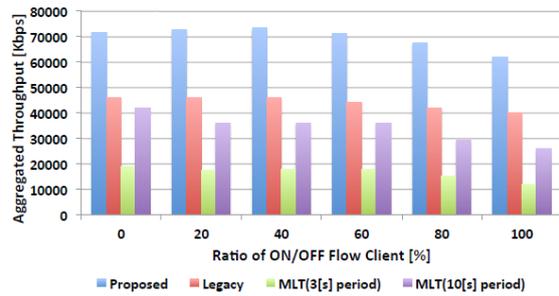


図4 集約スループット

図4は、各方式での集約スループット（全 AP のスループットの合計）を比較している。この結果より、提案方式はレガシ方式と比べ、集約スループットを最大で約59%向上できたことが分かる。また MLT 方式は、前述した影響により集約スループットがレガシ方式よりも劣るという結果となった。その影響は、トポロジの更新周期を短くする（3秒）ことで、さらに顕著となった。

公平性の指標として、Jain's Fairness Index を用いた。Fairness Index は次式で表される。

$$f = \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (1 \leq i \leq n).$$

Jain's Fairness Index は、 $f$  の値が1に近いほど公平性が高いことを示す。

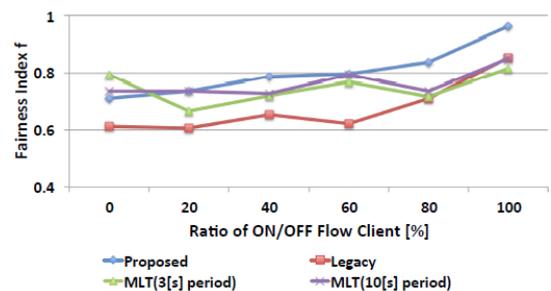


図5 Jain's Fairness Index

この指標の測定結果を図5に示す。提案方式は、ON/OFF フロークライアントが 0%の時を除いた全ての場合において、他の方式と比べ同等以上の公平性を得られることが分かる。特にレガシ方式と比較して、最大で約 28%の公平性の向上を達成し、ON/OFF フロークライアントが 100%の場合、 $\mu=0.9617$  という高い公平性を得た。MLT 方式は、公平性について考慮されている方式であるため、ON/OFF フロークライアントの割合によらず、比較的良好な公平性を保っている。しかし、MLT 方式では、パケットサイズが固定長であるなど、比較的規則的なトラヒックを対象としており、ON/OFF フロークライアント数の増加による不規則なトラヒックの割合の増加につれ、提案方式との差が大きくなることが分かる。

本研究により、仮想化 WNIC を用いた動的負荷分散方式が、AP の集約スループットや端末間の公平性を向上するうえで有効であることが明らかとなった。

本研究の今後の進展として、既存研究で提案されている様々な AP 選択方式を本提案方式に組み込んで運用した際に、各 AP 選択方式の特性の違いが、全体の性能にどのように影響するかについて調査を行う必要があると考えている。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 3 件)

1. 玉井森彦, A Trigger-based Dynamic Load Balancing Method for WLANs Using Virtualized Network Interfaces, IEEE WCNC2013, 中国上海, 2013. 4. 8.

2. 河田真宏, 仮想化ネットワークインターフェースを用いたトリガ駆動に基づく Wi-Fi アクセスポイントの動的負荷分散方式, 第 65 回 MBL・第 37 回 UBI 合同研究発表会, 東京大学, 2013. 3. 14.

3. 河田真宏, 仮想ネットワークインターフェースを用いた無線 LAN ネットワークにおける動的負荷分散方式の提案, DICOM2012 シンポジウム, 石川県加賀市, 2012. 7. 4.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]  
なし

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

玉井 森彦 (TAMAI MORIHIKO)

奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・助教

研究者番号 : 90523077