

CHASA: 通信トラフィックを考慮した無線 LAN アクセス ポイント移動システム

小林祐斗^{†1} 高橋淳二^{†2} 戸辺義人^{†2}

概要: 近年のモバイル端末の普及に加え, 動画や音楽などのストリーミングサービスの普及により, 無線 LAN での通信の安定性が求められている. しかし, 現在, 無線 LAN アクセスポイントの配置に際して, 利用者の細かい位置まで考慮されていないため, 利用者全体の通信スループットが最大になるとは限らない. そこで本研究では, 通信スループットが高くなる位置に AP 自身が移動するというシステム CHASA を提案, 実装し, 基本性能を評価する.

CHASA: System of a Movable WiFi Access Point Considering Traffic

YUTO KOBAYASHI^{†1} JUNJI TAKAHASHI^{†2}
YOSHITO TOBE^{†2}

1. はじめに

近年のモバイル端末の普及に加え, 動画や音楽などのストリーミングサービスの普及[1]により, 無線 LAN での通信の安定性が求められている. 無線 LAN の規格として IEEE が策定した IEEE802.11 が存在し, 多くの無線 LAN 製品に使用されている. 現在, もっとも普及している規格は 2009 年に策定された IEEE802.11n であり, チャンネルボンディング[2]や MIMO[3][4]により, 高速化が可能となった.

チャンネルボンディングは, 隣り合う複数のチャンネルを束ねて通信することによって高速化を図る技術である. 一方の MIMO は, 複数のアンテナを使用してデータを送ることによって高速化を図る技術である. MIMO による通信を行うためには受信側と送信側でそれぞれ複数のアンテナを用意する必要がある. アンテナの数が多ければほど高速化され, IEEE802.11n では最大 4 つのアンテナを使用してデータの通信を行うことができる.

このように, 無線 LAN による通信を高速化する技術は多数研究されており, 通信速度は飛躍的に向上している. しかし, さらに無線 LAN で快適な通信を行うためには, 接続状況も考慮する必要がある. ところが, 現状では AP は一定の位置に固定されているため, 接続端末の位置の変化に対応することができない.

接続端末の位置が変化したときに, その位置を考慮して AP の最適な配置を計算しその場所へ再配置することができれば, いかなる状況でも無線 LAN による最適な通信を提供することができる. そこで本研究では, もっとも通信効率が良くなる位置に無線 LAN AP 自身が移動するというシステム CHASA (CHASing Access point) を提案, 実装し, 基本性能を評価する.

本論文の構成について説明する. 第 2 章では, 無線 LANAP の通信スループットを向上させる関連研究について述べる. 第 3 章では, 予備実験を行う. 第 4 章では, 本論文で用いる記号の定義や, 通信トラフィックの定義について述べる. 第 5 章では, CHASA の設計について述べる. 第 6 章では, CHASA の実装について述べる. 第 7 章では, CHASA の実験を行い, 基本性能を評価する. 第 8 章では, 本論文の結論を述べる.

2. 関連研究

無線 LAN でのスループットを向上させる研究として, 電波干渉を起ささないように AP の配置を最適化させる研究[5]がある. この研究では, AP への接続がどの地点で行われるかを推定した結果を地図上に表す接続需要マップを用いて, AP へ接続できる範囲を最大化し, お互いの AP のチャンネルを考慮して電波干渉を抑えてスループットを高めることができる. しかし, 実際に使用される環境では, AP 利用者の位置は細かく変動するため AP の最適な配置は変化してしまうが, この研究ではこういった変化には対応できないため, 常にスループットを向上できるとは限らない.

また, 無線 LAN での電波の干渉を抑えてより遠くまで電波を飛ばし, 安定した通信を提供する技術としてビームフォーミング[6]という技術がある. ビームフォーミングは指向性の高い電波を端末に向けて送信することで電波強度を向上することができ, また AP と端末間の必要な空間のみに絞る電波を飛ばすため, 空間を効率よく利用することができる. ビームフォーミングは AP 側のアンテナと端末の両方がビームフォーミング技術に対応していなければならない. また, 電波強度を向上することのできる方位はアンテナの数によって限られるため, 全端末のスループットを向上できるとは限らない.

^{†1} 青山学院大学大学院理工学研究科理工学専攻知能情報コース

^{†2} 青山学院大学理工学部情報テクノロジー学科

3. 予備実験

3.1 実験目的

AP と接続端末との距離によって通信スループットが落ちることを確認するため、実際に距離ごとにスループットを測定する。端末の受信アンテナの性能にも差があるため、複数の端末を用意して実験を行う。

3.2 実験環境

AP は RaspberryPi Model B (以下, RaspberryPi) と、無線 LAN アダプタとして WLI-UC-GNM2 を組み合わせて構築する。WLI-UC-GNM2 は、BUFFALO 社から発売されている IEEE802.11n に対応した Wifi ドングルである。

接続端末には、スマートフォンとノートパソコンの 2 種類を用意する。それぞれの端末の性能を表 3-1, 表 3-2 に示す。

表 3-1 使用したノートパソコンの仕様

項目	性能
機種名	PC-HZ550BAB
OS	Windows 8.1 Update 64 ビット
CPU	Intel® Core™ i5-5200U 2.20GHz
無線 LAN	IEEE802.11ac/a/b/g/n 準拠

表 3-2 使用したスマートフォンの仕様

項目	機種
機種名	Nexus5
OS	Android4.4.3
CPU	Qualcomm Snapdragon™ 800 2.26 GHz
無線 LAN	IEEE802.11ac/a/b/g/n 準拠

3.3 実験結果

実験によって得られた結果を図 3-1 に示す。

図 3-1 のスマートフォンを見ると、距離の増加に伴いスループットが減少していることがわかる。一方のノートパソコンはスループットの減少はあまりみられない。端末の受信能力によって、距離によるスループットの減少率は大きく変わることがわかる。

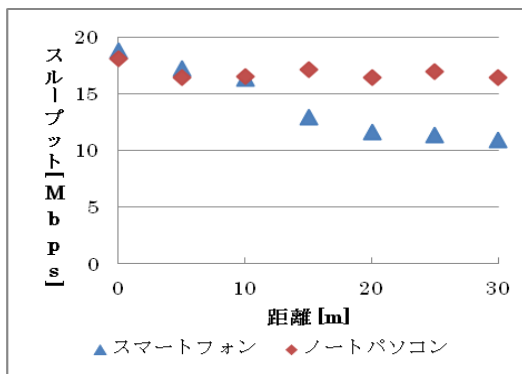


図 3-1 AP と端末の距離とスループット関係

4. 通信トラヒック

4.1 記号の定義

本論文において用いる記号を、以下のように定義する。

MA : Moable AP (CHASA で用いる移動式 AP)

(x_A, y_A) : MA の位置

LA : Landmark AP (従来の固定された AP)

N : クライアントの数

C_i : クライアントの位置 ($i=1\sim N$)

Th_i : 通信スループット

RTT_i : Round Trip Time ($i=1\sim N$)

4.2 通信トラヒックの種類

AP に接続するクライアントは、通常、AP や AP に接続中の他のクライアントと通信するのではなく、AP を介して接続される外部のホストと通信する。クライアントと外部のホストとの通信トラヒックは、そのクライアントの利用者の動作によって様々なパターンが考えられる。典型的な動作として、(T1) メール送受信、(T2) HTTP GET 要求による Web アクセス、(T3) 動画ストリーム受信を考えてみる。T3 では連続的にトラヒックが発生しているのに対し、T1, T2 では、間欠的にしかトラヒックが発生しない。図 4-1 に示されるように、観測間隔によっては、T1, T2 のトラヒックを観測することができない区間も出てくるので、観測間隔も本来は、複数粒度で考慮する必要がある。

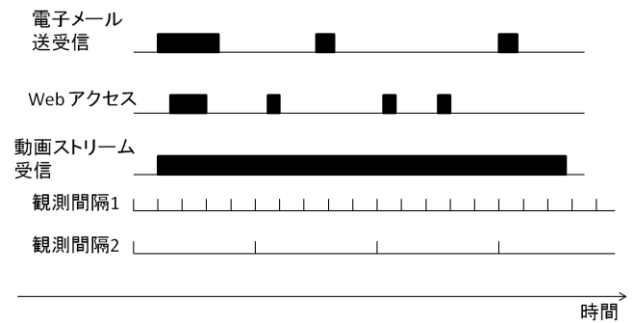


図 4-1 通信トラヒックの種類

4.3 通信トラヒックの測定

通信トラヒックを測定したとき、その通信トラヒックは本来通信したいと思っている通信量ではなく、通信路の性能によってある程度制限されていることが考えられる。例えば、大容量ファイルをダウンロードするときには、本来は 1 回のパケット送受信でダウンロードできることが理想だが、通信路によって通信量が制限されてしまうため、多少時間が掛かってしまう。従来の通信トラヒックの測定方法だと通信路によって制限された通信トラヒックしか取得できないため、本来、クライアントが必要としている通信トラヒックを求めめるためには、4.2 節で述べた利用者の動

作による通信トラヒックの分類等を考慮する必要がある。しかし本研究では、本来、クライアントが必要としている通信トラヒックの測定は行わず、通信路によって決められる最大の通信トラヒックである通信スループットを使用することとする。

5. CHASA の設計

5.1 全体設計

CHASA では、図 5-1 の流れで処理を行う。

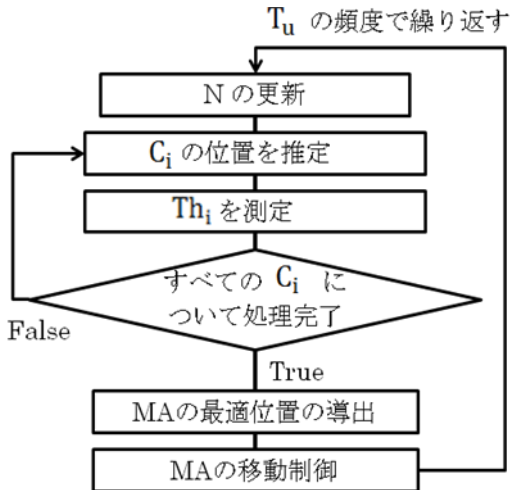


図 5-1 CHASA のフローチャート

MA に接続するクライアントの台数はある程度変動があることが考えられるため、まず N を確定させる。

次に、すべてのクライアントに対して C_i 、 Th_i を求める。 C_i は、Wi-Fi の電波を用いた位置推定手法で求める。主な位置推定の手法は 5.2 節で述べる。 Th_i は、4.3 節で述べたようにクライアント毎の通信スループットを求める。通信スループットの定義は 5.3 節で述べる。次に、MA の最適位置を導出する。最適位置の導出方法は 5.4 節で述べる。最後に、MA の移動制御を行う。これは、MA を最適位置に移動させる処理である。これらの処理を T_u の頻度で繰り返すことで、MA が常に最適位置に移動するように更新していく。

5.2 位置推定の手法

5.2.1 フィンガープリント法

フィンガープリント法[7]では、あらかじめ様々な地点で受信電波の特徴量を測定し、場所と特徴量との関連付けを行う。実際にクライアントの位置を推定するときに、クライアントの受信電波の特徴量と、事前に測定した特徴量とマッチングを行い、一番近い特徴量を持つ場所をクライアントの位置とする。事前にあらゆる地点の電波環境を測定する必要があるため準備が必要であるが、比較的、位置推定の精度は高い。

5.2.2 セル ID 法

セル ID 法[8]では、周期的にビーコンを発するノードを事前に配置し、クライアントが取得したビーコンを発しているノードをクライアントの位置とする。複数のビーコンを取得した場合は、それぞれのビーコンが発するノードの中点を取ることで位置を推定する。比較的、位置推定の精度は高いが、精度を高めるためにはノードの数を増やす必要がある。

5.2.3 三点測量法

三点測量法は、座標が判明している 3 つの基準点を利用し、それぞれの基準点から端末への距離を基にして位置を推定する方式である。基準点から端末までの距離を求める方法としては、TOA (Time of Arrival) や RSSI (Received Signal Strength Indicator) を用いる方法[9]がある。TOA は、それぞれの基準点から同時に発したビーコンの端末での到着時間の差から距離を推定する方法である。それぞれの基準点から同時にビーコンを発するため、非常に正確に時刻を同期させる必要がある。また、RSSI を用いる方法は、RSSI が飛行距離によって減衰するという性質を用いて電波の減衰から距離を推定する方法である。

5.3 通信スループットの定義

無線 LAN 環境下において、通信スループットは RSSI と比例することが知られている[10]。よって、式 (1) が成り立つ。

$$Th_i \cong uRSSI_i \quad (1)$$

また、クライアントと通信中の外部ホストとの距離が長ければ長いほど通信スループットは下がるため、RTT の値に反比例する。よって、式 (2) が成り立つ。

$$Th_i \cong u \frac{RSSI_i}{RTT_i} \quad (2)$$

このとき、 u を比例定数とする。

5.4 最適位置の導出

本稿では最適位置を、MA に接続しているすべてのクライアントの通信スループットを最大化する位置とする。したがって、最適位置を求める問題は式 (3) で示される。

$$\max \sum_{i=1}^N Th_i \quad (3)$$

式 (2) より, Th_i は RSSI に比例する. RSSI は AP とクライアントの距離 d によって変化するため, 式 (4), 式 (5) が成り立つ.

$$RSSI_i = k_i d_i^{-\alpha} + e \quad (4)$$

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_A)^2 + (y_i - y_A)^2} \quad (5)$$

ここで, k_i 比例定数, e をノイズの値とする. これ以降は e を無視して考える.

また, α の値は端末の電波受信能力によって異なるため, 実測値を用いる.

したがって, 下記式 (6) により最適配置を求める.

$$\max_u \sum_{i=1}^N \frac{k_i \{(x_i - x_A)^2 + (y_i - y_A)^2\}^{-\frac{\alpha}{2}}}{RTT_i} \quad (6)$$

式 (6) は非線形のため, 解析的に解くことは容易ではない. そのため, 近似値を求めるアルゴリズムを用いる. 代表的な近似値を求めるアルゴリズムには, 山登り法, 最急降下法がある.

5.4.1 山登り法

山登り法のアルゴリズムを図 5-2 に示す.

ここで, $neighbors(x, y)$ は, (x, y) の近傍点をすべて取得する関数, $f(x, y)$ は, 最適化の式を表す.

Input では入力に初期値として適当な位置座標を設定し, Output では最適化された位置座標が出力される.

```

Input x, y
s ← f(x, y)
while
  ns ← -infinity
  foreach cx, cy ← neighbors(x, y)
    if ns < f(cx, cy)
      ns ← f(cx, cy)
  nx ← cx
  ny ← cy
end
if s >= ns
  break
s ← ns
end
Output nx, ny

```

図 5-2 山登り法のアルゴリズム

山登り法は, 初期値の近傍点を評価して初期値の評価よりも高かった場合にその点を最適位置として設定し, その最適位置の近傍点を評価していき, 評価値の高い近傍点があった場合, 最適位置を更新していく. 最適位置の近傍点に評価値の高い点が無くなるまで更新を続けていき, 更新が終わったときの最適位置を最終的な最適位置とするというアルゴリズムである.

5.4.2 最急降下法

最急降下法のアルゴリズムを図 5-3 に示す.

```

Input x, y
while
  x ← x + μ * ∂f(x,y)/∂x
  y ← y + μ * ∂f(x,y)/∂y
  θ ← ∂f(x,y)/∂x + ∂f(x,y)/∂y
do θ > ε
Output x, y

```

図 5-3 最急降下法のアルゴリズム

ここで, μ は 1 回の更新における解の変化率を表す.

Input では入力に初期値として適当な位置座標を設定し, Output では最適化された位置座標が出力される.

最急降下法は, 関数の傾きから解を更新していき, 最適値へ収束させるアルゴリズムである. 微分値 θ が一定の値 ϵ を下回ったら, 解が収束したと見なし, 更新をやめる.

5.5 線形制条件下における最適位置の導出

CHASA では, MA に可動域が存在することがある. 特に, 可動域が直線であるとき, 最適位置の決定時に用いる最適化式に線形制約を追加する.

$$ax_A + by_A + c = 0 \quad (7)$$

この制約条件により, 式 (6) は式 (8) に変形できる.

$$\max_u \sum_{i=1}^N \frac{k_i \left\{ (x_i - x_A)^2 + \left(y_i + \frac{ax_A + c}{b} \right)^2 \right\}^{-\frac{\alpha}{2}}}{RTT_i} \quad (8)$$

また、線形条件下の場合、MAの可動域は直線となり、その長さは無線LANの電波の性質上100m以内であると考えられる。

この場合、図5-4で示すような、MAの可動域を一定の間隔 t でサンプリングを行い、サンプリングしたすべての位置の評価を行い、評価値が最大化となる位置を最適位置とする、全探索に近い方法も十分可能であると考えられる。

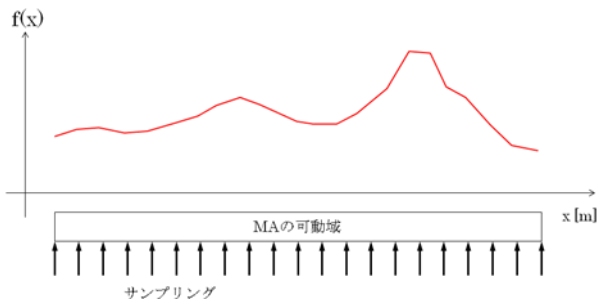


図 5-4 MA の可動域でのサンプリング評価

6.CHASA の実装

CHASA を制御するためのコンピュータとして、RaspberryPiを使用する。OSはRaspbian ver.4.1を用いている。

6.1 APの実装

RaspberryPiをAPとして動作させるために、無線LANアダプタとしてWLI-UC-GNM2を使用する。さらに、RaspberryPiにhostAPDとbridge-utilsをインストールしてAPとして動作するように設定する。hostAPDは、無線LANアダプタをAPとして動かすために必要なアプリケーションである。図6-1にhostAPDの設定ファイルの一部を示す。

また、bridge-utilsは、無線LANネットワークインタフェースと有線LANネットワークインタフェースをブリッジ接続するために使用する。CHASAでは、ゲートウェイに接続するために有線LANによる接続を行うため、ブリッジ接続が必要になる。

```
interface=wlan0 // 無線 LAN ネットワークインタフェースの指定
bridge=br0 // ブリッジの設定
driver=nl80211 // 無線 LAN ドライバの設定
ssid=CHASA // SSID 名の設定
hw_mode=g // 2.4Ghz 帯を使用
channel=2 // 使用する周波数帯のチャンネルを 2 に設定
ieee80211n=1 // IEEE802.11n の機能を On にする
```

図 6-1 hostAPD の設定ファイルの一部

6.2 CHASA の移動機構の構築

6.2.1 CHASA の構成

CHASA を移動させるためにRaspberryPiにモータと電源を取り付けた。

CHASA の回路図を図 6-2 に示す。RaspberryPi の General Purpose Input/Output (以下、GPIO)、モータ、モータドライバおよび電源を繋ぎ、回路を組む。モータには、タカトミー社のプラレール S-23 E257 系あずさを使用し、モータドライバ TA7291P を接続して制御可能にする。実際に作成した CHASA の回路を図 6-3 に示す。

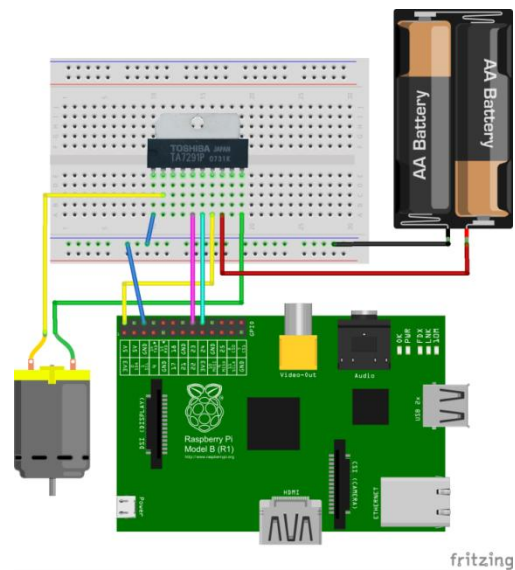


図 6-2 CHASA のハードウェア構成 (<http://fritzing.org/home/>)

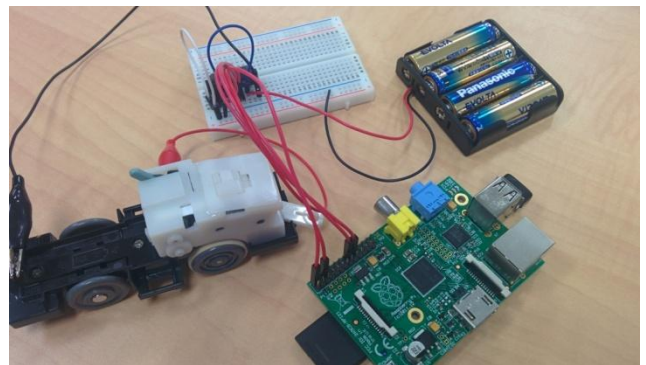


図 6-3 RaspberryPi によるモータ制御

6.2.2 CHASA の移動制御

CHASA の移動システムは、RaspberryPi からモータへコマンドを送信することにより制御されている。また、GPIO コマンドが使用可能になるライブラリ WiringPi をインストールし、RaspberryPi から前進、後退、停止の 3 種類のコマンドを送信できるようにする。

CHASA は事前に敷設しているレールの上を前後に移動できるものとする。レールには、タカトミー社の R-07 2 倍直線レールを使用する。

7. 評価実験

本章では、CHASA の実験を行い、有用性について評価する。

7.1 実験方法

CHASA の MA を用いた場合と従来の固定 AP を用いた場合で通信スループットを測定し、比較する。通信スループットは、クライアントが一定容量の測定用ファイルをダウンロードしたときの時間から求める。クライアントは複数台用意するため、比較する通信スループットはすべてのクライアントの通信スループットの合計値とする。

クライアントから測定用ファイルをダウンロードするためのネットワークの構成図を図 7-1 に示す。

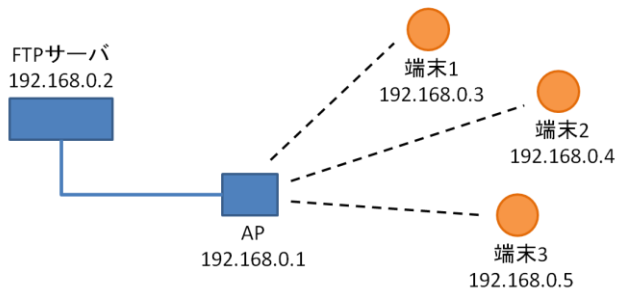


図 7-1 実験でのネットワーク構成

MA の IP アドレスを 192.168.0.2、測定用ファイルが配置されている FTP サーバの IP アドレスを 192.168.0.1 とする。クライアント端末の IP アドレスを 192.168.0.3, 192.168.0.4... と割り当てていく。

実験を行う環境を図 6-2 に示す。この部屋には一定間隔で机が並んでいる。実験時は周囲の電波の影響をなるべく受けないように、周囲で一番使われていないチャンネルを選択した。

実験は、クライアントの数や配置を変えて 2 種類行った。それぞれ、実験パターン 1、実験パターン 2 と呼び、実験パターン 1 はクライアントの数を 6 台用意し、配置は一樣に分布させた。端末 1 はノートパソコン、端末 2 から端末 6 はスマートフォンを使用した。一方、実験パターン 2 はクライアントを 4 台用意し、部屋の半分に偏るように配置した。端末 1 はノートパソコン、端末 2 から端末 4 はスマートフォンを使用した。

ノートパソコンとスマートフォンで用いたそれぞれの α の値を、以下に示す。

$$\alpha = \begin{cases} 0.05, & \text{ノートパソコン} \\ 0.15, & \text{スマートフォン} \end{cases}$$

それぞれのパターンにおいて CHASA の MA を用いた場合と従来の固定 AP を用いた場合の通信スループットを測

定する。それぞれのパターンのクライアントの配置を図 7-3、図 7-4 で示す。

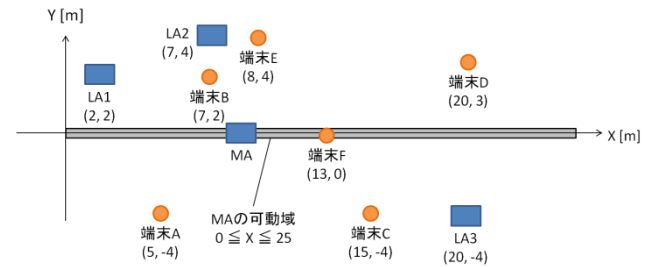


図 7-3 実験パターン 1 の配置

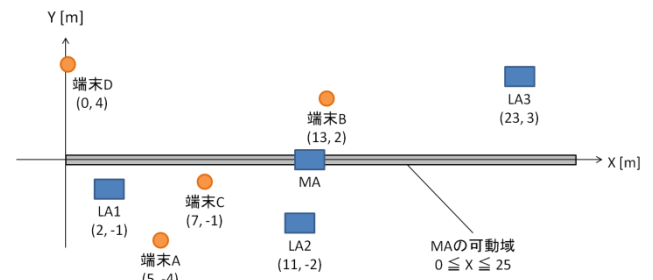


図 7-4 実験パターン 2 の配置

7.2 実験結果

7.2.1 実験パターン 1 の結果

実験パターン 1 での、端末毎の AP 別ダウンロード時間を表 7-1 に示す。また、このときの AP 別の全端末のダウンロード時間の合計を図 7-5 に示す。さらに、端末毎の AP 別通信スループットを表 7-2 に示す。

表 7-1 端末毎 AP 別のダウンロード時間 [s]

	MA	LA1	LA2	LA3
端末 1	1.7×10	1.6×10	1.7×10	1.8×10
端末 2	2.1×10	2.4×10	2.2×10	2.6×10
端末 3	2.2×10	2.7×10	2.3×10	2.2×10
端末 4	2.0×10	2.8×10	2.6×10	2.2×10
端末 5	2.2×10	2.5×10	2.1×10	2.5×10
端末 6	1.9×10	2.3×10	2.1×10	2.5×10
合計	1.21×10^2	1.42×10^2	1.29×10^2	1.37×10^2

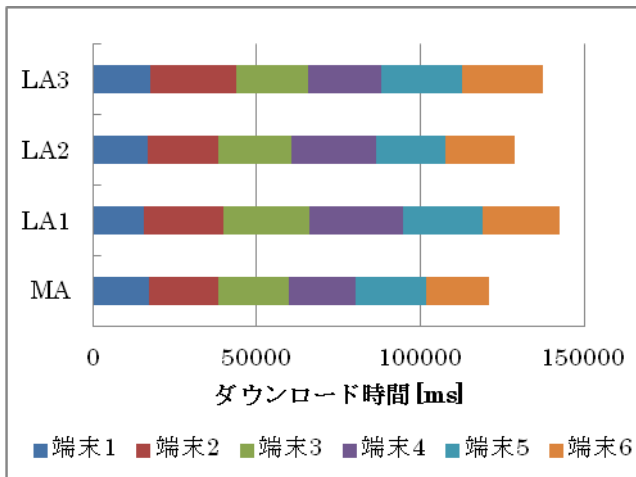


図 7-5 AP 別のダウンロード時間の合計

表 7-2 端末毎 AP 別の通信スループット [MB/s]

	MA	LA1	LA2	LA3
端末 1	1.15	1.27	1.20	1.13
端末 2	0.96	0.83	0.93	0.77
端末 3	0.92	0.75	0.89	0.91
端末 4	0.99	0.71	0.78	0.89
端末 5	0.92	0.81	0.95	0.81
端末 6	1.06	0.86	0.95	0.82
平均*	0.99	0.84	0.93	0.87

(*調和平均)

7.2.2 実験パターン 2 の結果

実験パターン 2 での、端末毎の AP 別ダウンロード時間を表 7-3 に示す。また、このときの AP 別の全端末のダウンロード時間の合計を図 7-6 に示す。さらに、端末毎の AP 別通信スループットを表 7-4 に示す。

表 7-3 端末毎 AP 別のダウンロード時間 [s]

	MA	LA1	LA2	LA3
端末 1	1.3×10	1.5×10	1.4×10	1.8×10
端末 2	2.1×10	2.1×10	2.2×10	2.0×10
端末 3	1.9×10	2.1×10	2.0×10	2.5×10
端末 4	2.1×10	2.1×10	2.1×10	2.5×10
合計	7.4×10	7.8×10	7.7×10	8.7×10

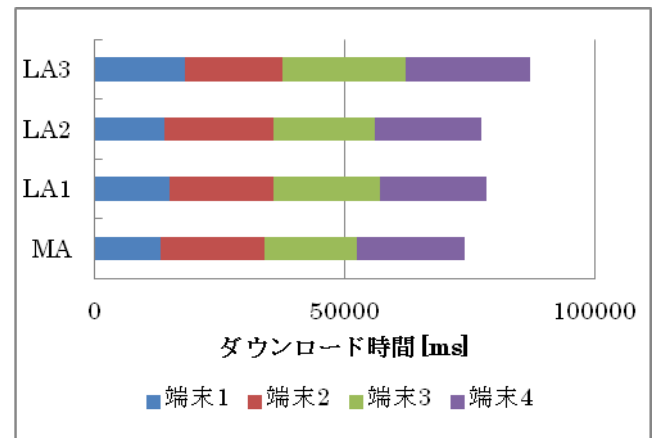


図 7-6 AP 別のダウンロード時間の合計

表 7-4 端末毎 AP 別の通信スループット [MB/s]

	MA	LA1	LA2	LA3
端末 1	1.51	1.34	1.42	1.11
端末 2	0.97	0.95	0.92	1.02
端末 3	1.08	0.95	0.98	0.81
端末 4	0.94	0.94	0.94	0.80
平均*	1.08	1.02	1.03	0.92

(*調和平均)

7.3 考察

実験パターン 1、実験パターン 2 共に MA の通信スループットが LA の通信スループットを上回っていることがわかる。LA の配置によっては、MA よりも端末に近い位置に配置されていることもあるため、LA の方が MA よりも通信スループットが高くなるような端末も存在するが、すべての端末の平均スループットを見ると、MA が一番高くなる。特に、実験パターン 2 では LA3 の配置をどの端末からも離れた位置に置いたため、他の AP と比較すると明らかに通信スループットが下がっている。

また、最適位置を求めてから MA がその場所に移動するまでに時間が掛かるため、実験での MA は常に最適位置にいるというわけではない。

8. むすび

本論文では、通信スループットが高くなる位置に AP 自身が移動するというシステム CHASA を提案し、基本性能を評価した。CHASA では、AP 自体がクライアントの状況に応じた最適位置に移動するため、常にすべてのクライアントの通信スループットが最大になるという特徴がある。

今後の課題として、4.3 節で述べた、通信トラヒックの種類を考慮した MA の最適位置決定が挙げられる。本来、クライアントが必要としている通信スループットが分かれば、より最適な位置を求めることができる。

また、現在は移動する AP は 1 つであったが、複数の AP

と協調させることでより快適な WiFi 環境を提供できると考えている。

参考文献

- [1] Cisco, “Cisco® Visual Networking Index™ (VNI) Global Mobile Data Traffic Forecast for 2014 to 2019”, February 3, 2015.
- [2] Texas Instruments Incorporated, “WLAN Channel Bonding: Causing Greater Problems Than It Solves”, September 2003.
- [3] Huawei Technologies Co., Ltd., “Huawei WLAN MIMO Technical White Paper”, 2012.
- [4] 大鐘武雄, 西村寿彦, 小川恭孝, “MIMO チャンネルにおける空間分割多重方式とその基本特性”, 電子情報通信学会論文誌 B Vol.J87-B No.9, pp.1162-1173, 2004.
- [5] Y. Lee, K. Kim, and Y. Choi, “Optimization of AP placement and Channel Assignment in Wireless LANs”, LCN 2002. 27th Annual IEEE Conf. on Local Computer Networks, IEEE Computer Society, November 2002, pp. 831-836.
- [6] A.B.Gershman, N.D.Sidiropoulos, S.Shahbazpanahi, M.Bengtsson, and B.Ottersten, “Convex Optimization-based Beamforming: From Receive to Transmit and Network Designs”, IEEE Signal Processing Magazine, 2010.
- [7] K. Kaemarungsi, and P. Krishnamurthy, “Modeling of Indoor Positioning Systems Based on Location Fingerprinting”, Proc. IEEE INFOCOM, May 2004.
- [8] E. Trevisani, and A. Vitaletti, “Cell-ID location technique, limits and benefits: an experimental study.”, Proceedings of the Sixth IEEE Workshop on Mobile Computing System and Applications, 2004.
- [9] P. Bahl and V. N. Padmanabhan, “RADAR: An In-Building RF-based User Location and Tracking System”, IEEE Infocom 2000, pp.775-784, 2000.
- [10] 長谷川公嗣, 武野紘和, 中津悠斗, 大宮学, “IEEE802.11n 無線 LAN による RSSI と平均 throughput の関係” 情報処理学会論文誌, Sep 2011, Vol.52, No.9, pp.2829-2840