

コンシューマ・システム論文

複数の無線通信サービスが混在した環境における使用アプリケーションを考慮した基地局割り当て手法

亀田 栄一^{1,a)} 篠宮 紀彦^{1,b)}

受付日 2015年1月26日, 採録日 2015年5月21日

概要: LTE が普及し、回線速度が向上している一方で、アプリケーションが必要とするデータ通信量も増加しているため、今後、公衆 WiFi 基地局の利用率は高まると考えられる。しかし、公衆 WiFi 基地局の処理負荷およびネットワークトラフィック負荷の増加により、RTT (ラウンドトリップタイム) は長くなる可能性がある。一方、ユーザが使用しているアプリケーションによって、必要とされる RTT は異なる。そこで、使用しているアプリケーションが必要とする RTT と、端末がある基地局に接続したとき、実際に得られる RTT との差を RTT ギャップと定義する。本研究では、複数の端末が接続先のサービスを決定する問題をグラフ理論によって定式化し、ハンガリアン法を活用した接続先決定ロジックにより、使用しているアプリケーションが要求する RTT を考慮し、システム全体として RTT ギャップを低減する手法を提案する。

キーワード: WiFi サービス, ラウンドトリップタイム, 割り当て問題

A Station Assignment Method Considering Applications Being Used in a Mixed Environment of Different Wireless Communication Services

EIICHI KAMEDA^{1,a)} NORIHIKO SHINOMIYA^{1,b)}

Received: January 26, 2015, Accepted: May 21, 2015

Abstract: While the LTE has been in widespread use and the line speed for data communications has also been improved, the exploding data traffic that evolving applications require is thought to increase the utilization factor of public WiFi services from now on. The round trip time (RTT), however, might become longer for reasons of throughput degradation on a public WiFi station or increasing heavy network load. On the other hand, the required RTT is totally dependent on the application which a user is working on. This paper defines a RTT gap that is the difference between the required RTT for a user's application and the actual RTT obtained when a mobile terminal gets connected to a station. The paper firstly formulates a problem to assign some mobile terminals with the different communications services by means of graph theory, and it also proposes a method to reduce the RTT gap in the whole system with considering the required RTT for user's applications based on a connection service determination logic by Hungarian method.

Keywords: WiFi service, round-trip time, assignment problem

1. はじめに

LTE 回線が徐々に普及し、回線速度は向上しているが、スマートフォンなどで使用されるアプリケーションが必要

とするデータ通信量も増加しているため、今後、人が集中する場所や時間帯などの条件により、ユーザが体感するレスポンスタイムは長くなる可能性がある。これを回避するため、各キャリアは、3G 回線や LTE 回線から、固定の公衆 WiFi 基地局へのオフロード対応を行っている。現在は、公衆 WiFi 基地局への接続切り替えがスムーズにいかないなどの理由で、十分に活用されていない場合もあるが、今後も公衆 WiFi 基地局の利用率は高まると考えられる。

¹ 創価大学工学研究科
Graduate School of Engineering, Soka University, Hachioji,
Tokyo 192-8577, Japan
a) e07d5203@soka.ac.jp
b) shinomi@soka.ac.jp

しかし、公衆 WiFi 基地局の利用率が高まると、次に示す 2 つの要因によってレスポンスタイムの悪化を招く可能性がある。まずはじめに、公衆 WiFi 基地局の利用端末数が増加すると、公衆 WiFi 基地局のハードウェアとしての処理負荷や、バックボーンネットワークのトラフィック負荷により、公衆 WiFi 基地局経由のアクセスのレスポンスタイムが悪化する可能性がある。次に、電波干渉によるレスポンスタイムの悪化である。駅やイベント会場などでは、ユーザが個々に所有する移動型の WiFi 基地局の増加により、公衆 WiFi 基地局を含めた WiFi 基地局同士の電波干渉によってレスポンスタイムの悪化を招く可能性がある。これらの問題のうち、本研究では、前者の公衆 WiFi 基地局における通信量増大によるレスポンスタイムの悪化について、その回避策を提案する。

公衆 WiFi 基地局におけるレスポンスタイムの悪化については、現在様々な研究が行われている。文献 [1] では、データアップロードを最適化するための通信制御方式を提案している。文献 [2] では、通信品質が劣化した状態におけるアプリケーションレベル通信遅延低減方式を提案している。しかし、このような通信方式に関する技術が進展することと平行して、アプリケーションが必要とするデータ通信量は増大し、必要とするレスポンスタイムは短くなり、いたちごっこの状態にある。よって本研究では、ユーザが利用できる通信環境が変わらない場合における、基地局と端末の最適な組み合わせについて考える。

あるエリアにおいて、ユーザが利用できる無線通信サービスの基地局数、各基地局における端末収容数やラウンドトリップタイム（以下、RTT）、利用可能帯域などの条件が変わらない場合、対象エリアにいるユーザ全体のレスポンスタイムの悪化を防ぐには、各端末が要求するレスポンスタイムを必要最小限満たすことのできる基地局に接続させることが望ましい。RTT が短い基地局に対して、短い RTT を必要としない端末が接続されることにより、本来短い RTT を必要とする端末が、条件を満たす基地局に接続できない、という状況が起こりえる。このミスマッチを解消することが、対象エリアにいるユーザ全体のレスポンスタイムを向上させることにつながると考えられる。本研究では、このミスマッチの解消を研究の目的とする。

ミスマッチ解消の手段として、各端末で使用されているアプリケーションに応じて、必要とされる RTT が異なる点に着目する。端末で使用されているアプリケーションが必要とする RTT をもとに、接続先の基地局を決定するロジックを実現することにより、過剰なサービス割り当てを削減できると考えられる。

なお、接続先決定ロジックにおいては、個々の端末が独立して接続先を決定するのではなく、端末で使用されているアプリケーションをもとに、サーバが各端末にとって最適な接続先を算定し、端末に制御情報を伝達する。

2 章では、本研究で着目する RTT ギャップについて定義し、接続先決定ロジックを割り当て問題として定式化する。3 章では、関連研究における本研究の位置づけを述べる。4 章では、本研究で提案するシステムについて説明する。5 章では、本システムのシミュレーション実験の結果について述べ、評価する。6 章でまとめと今後の課題について述べる。

2. 割り当て問題への定式化

2.1 RTT ギャップの定義

モバイル端末を使用しているユーザが体感するレスポンスタイムは、モバイル端末がある基地局に接続した場合に得られる RTT が、端末上で使用されているアプリケーションが必要とする RTT より長くなった場合に、悪化すると考えられる。そこで、使用しているアプリケーションが必要とする RTT（必要 RTT）と、端末がある基地局に接続した場合に得られる RTT（接続時 RTT）との差を、RTT ギャップと定義し、対象エリア内の端末全体の RTT ギャップを低減させることを検討する。RTT ギャップ (G_{RTT}) は、必要 RTT (RTT_{need}) および接続時 RTT (RTT_{link}) より、式 (1) で表される。

$$G_{RTT} = RTT_{link} - RTT_{need} \quad (1)$$

2.2 アプリケーションが必要とする RTT

アプリケーションが必要とする RTT は、アプリケーションの種類によって異なる。ただし、異なるアプリケーションであっても、たとえば同じ「通話を目的としたアプリケーション」であれば、同様の RTT が必要と考えられる。そこで、ここではアプリケーションを以下の 3 種類に分類し、それぞれの必要 RTT を算出する

- 通話アプリケーション
- ブラウザ
- その他（リアルタイム性を必要としないアプリケーション）

2.2.1 通話アプリケーション

通話アプリケーションについては、総務省が「050 IP 電話」の遅延の基準を「400 ms 未満」と定めている [3]。この値は、対象端末から相手端末までの到達時間の基準である。よって、対象端末からアクセス回線までの間で必要な RTT は、400 ms の半分の 200 ms 程度と考えることができる。なお、ここでは音声のみの通話を対象としており、必要なスループットは十分に小さいと考えられるため、必要 RTT は回線のスループットに影響されることはないかと仮定している。

2.2.2 ブラウザ

主なポータルサイトのトップページのデータ量を表 1 に示す。多くのサイトのトップページが 1,500 kB 以下である

表 1 ポータルサイトにおけるトップページのデータ量
Table 1 Data volume of common portal websites.

| サイト名 | URL | データ量 (kB) |
|----------|-----------------------|-----------|
| Yahoo! | m.yahoo.co.jp | 467 |
| goo | www.goo.ne.jp | 730 |
| MSN | jp.msn.com | 580 |
| Infoseek | www.infoseek.co.jp | 1,390 |
| Excite | a.excite.co.jp | 1,463 |
| はてな | www.hatena.ne.jp | 1,480 |
| ライブドア | www.livedoor.com/lite | 573 |
| 価格 com | s.kakaku.com | 817 |
| amazon | www.amazon.co.jp | 608 |
| 朝日新聞 | www.asahi.com | 1,073 |
| 読売新聞 | www.yomiuri.co.jp | 1,004 |
| 日経新聞 | www.nikkei.com | 1,147 |
| 毎日新聞 | sp.mainichi.jp | 3,337 |
| 産経新聞 | sankei.jp.msn.com/smp | 656 |

表 2 アプリケーションが必要とする RTT
Table 2 RTTs required by applications.

| アプリケーションの種類 | 必要 RTT |
|-------------|--------|
| 通話アプリケーション | 200 ms |
| ブラウザ | 85 ms |
| その他 | 制限なし |

ため、ここでは 1,500 kB のサイトに接続した場合について考える。また、Forrester Consulting の報告によると、約半数のユーザが 2 秒以下のレスポンスタイムを期待している [4]。x[B] のデータを y[s] で表示させるために必要なスループット T[bps] は、式 (2) で表せることから、1,500 kB のサイトを 2,000 ms で表示させるために必要なスループットは、6 Mbps である。

$$T = 8x/y \tag{2}$$

さらに、TCP におけるウィンドウサイズが 64 kB の場合、T[bps] のスループットを実現するために必要は RTT R[s] は、式 (3) で表せることから、6 Mbps を実現するために必要な RTT は、85 ms となる。

$$R = 64/8T \tag{3}$$

2.2.3 各アプリケーションの必要 RTT

以上のことから、各アプリケーションにおいて必要な RTT を表 2 のように定義する。

2.3 接続時 RTT

ある端末がある基地局に接続した場合に得られる RTT は、実際にその基地局に接続しないと正確には把握できない。しかし、各端末がすべての基地局に接続して RTT を計ることは現実的ではない。そこで本研究では、PathQuick の技術を利用して、各基地局における RTT を定期的に把

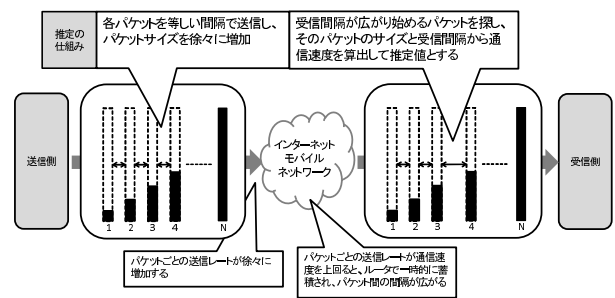


図 1 PathQuick の仕組み [5]

Fig. 1 Basic mechanism of PathQuick.

握することとする。PathQuick は、各パケットを等しい間隔で送信し、パケットサイズを徐々に増加させていくことにより、受信間隔が広がり始めるパケットのサイズと受信間隔から、通信速度を算出する手法である [5]。PathQuick の仕組みを図 1 に表す。PathQuick によって算出されたスループットを元に、式 (3) を使用して各基地局からアクセス回線までの RTT を算出する。

ただし、基地局に接続した場合に得られる RTT は動的に変化すると考えられるが、そのつど PathQuick による値の取得を行うことは、処理時間の観点から考えて現実的ではない。一方、ある基地局の RTT は、その基地局に接続している端末の数に影響されると考えられる。そこで、PathQuick による RTT の取得を定期的に行い、その後の RTT の変化は、接続端末数から計算することとする。今、PathQuick によって得られた、ある基地局の RTT の値を RTT_{pq} とし、その後にその基地局に接続された端末数を x としたとき、その基地局の接続時 RTT (RTT_{link}) は、以下のように表すことができる。

$$RTT_{link} = RTT_{pq} + f(x) \tag{4}$$

なお、周波数チャネルが重なるような隣接する公衆 WiFi 基地局間では、一方の公衆 WiFi 基地局に接続された端末が、他方の公衆 WiFi 基地局の RTT にも影響を与えることが想定される。しかし周波数チャネルの重なりは最小限に抑えるよう、ある程度計画的に配置されているものとし、前述のような影響は限定的であると考え、ここでは無視して考えている。

2.4 割り当て問題への定式化

基地局 sa の収容可能数を x 、基地局 sb の収容可能数を y 、基地局 sc の収容可能数を z とすると、 $sa_1, sa_2, \dots, sa_x, sb_1, sb_2, \dots, sb_y, sc_1, sc_2, \dots, sc_z$ のアクセスポイントが存在するととらえることができる。収容数の合計を $m = x + y + z$ とする。今、同じエリア内に端末 t_1, t_2, \dots, t_n が存在しているとすると、本研究で考える接続先決定ロジックは、 m 個から n 個だけ抽出したアクセスポイントと、 n 個の端末における、RTT ギャップの総和が最小となる割り当て問題ととらえることができる。割り当て問題とは、

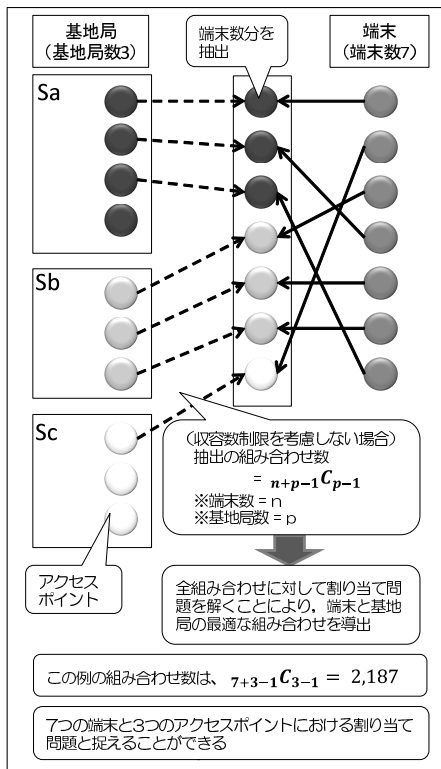


図 2 割り当て問題への定式化

Fig. 2 Formulation for an assignment method.

2部グラフの重みを最小（もしくは最大）にする完全マッチングを解く問題であり、これはグラフ理論の手法の1つである。m個からn個のアクセスポイントを抽出するすべての組み合わせに対して、割り当て問題を解くことにより、システム全体のRTTギャップを最小化する、基地局と端末の組み合わせを導出することができる。このとき、収容数制限を考慮しない場合に取り得る組み合わせ数は、端末数nをアクセスポイント数pに分類する組み合わせ数と等しく、「 $(n+p-1)C_{p-1}$ 」と表すことができる。割り当て問題への定式化の概要を、図2に示す。なお本研究では、割り当て問題の導出手法として、ハンガリアン法を用いる[6], [7], [8], [9]。

3. 関連研究における本研究の位置づけ

本章では、関連研究における本研究の位置づけを述べる。なお、「WiFi基地局」について「アクセスポイント」と表現している関連研究もあるが、ここでは本研究で示すアクセスポイントと区別するため、表現を「WiFi基地局」で統一している。

WiFi基地局の選択に関する研究として、文献[10], [11], [12], [13]がある。文献[10]では、ネットワークトラフィック負荷の分散のために、チャネル利用率の高いWiFi基地局からチャネル利用率の低いWiFi基地局へ端末を移動させることを検討している。文献[11]では、各WiFi基地局に接続した場合のスループット、他の端末の通信状況を考

慮して、接続するWiFi基地局を選択することを検討している。文献[12]では、各WiFi基地局の遅延、スループットなどの状態から、端末が接続されるべきWiFi基地局を、ヒューリスティックなロジックにより決定する提案を行っている。文献[13]では、端末とWiFi基地局間のピーコン情報に、WiFi基地局の負荷に関するフィールドを追加し、端末がWiFi基地局に接続した場合の負荷状況を考慮して、接続するWiFi基地局を選択するシステムを提案している。しかし、文献[10], [11], [12], [13]は共に、ユーザが使用しているアプリケーションにより、必要な環境が異なることは考慮されていない。

使用しているアプリケーションを考慮したWiFi基地局選択の研究としては、文献[14], [15], [16]がある。文献[14]においては、特定のアプリケーションを使用している通信について、伝送レートをもとにWiFi基地局を切り替えることにより、QoSを確保することが提案されている。また、文献[15]においては、端末で使用されているアプリケーションの種類に応じて、電波強度、利用可能帯域、遅延などをもとに、適切な経路を選択する方式が提案されている。文献[16]においては、FTPに代表されるTCPトラヒックと、VoIPに代表されるUDPトラヒックの違いを考慮した、WiFi基地局の選択アルゴリズムを提案している。しかし、これらの提案においては、同時に複数の端末を接続させる場合の対応については、検討されていない。

本研究では、同時に複数の端末が基地局に接続する場合の組み合わせを割り当て問題としてとらえ、ハンガリアン法を活用することにより、基地局を適切に端末に割り当てる方式について提案する。

4. 提案システム

提案システムは、接続時RTT取得部、接続先決定部、端末制御部の3つの部分により構成される。本章では、各構成部について説明する。

なお、提案システムの構成としては、分散制御型ではなく、集中制御型を採用している。これは、各基地局に接続した場合に得られるRTTが基地局により異なり、端末側の情報のみでは正確に判断できないためである。本システムにおいては、接続先コントロールサーバが各基地局の情報収集および各端末が接続する基地局の決定を行い、決定結果を端末に配信する。

ここで、コントロールサーバによる情報収集、および決定結果の配信に時間を要することになる。しかし、ユーザがある一定時間以上、同じアプリケーションを使用し続ける状況においては、ある程度の時間ロスは許容できると考えられる。

また、本研究では、LTEやWiFiなどの基地局自体には変更を加えず、接続先コントロールサーバと端末のやりとりによって、最適な基地局への割り当てを実現する。

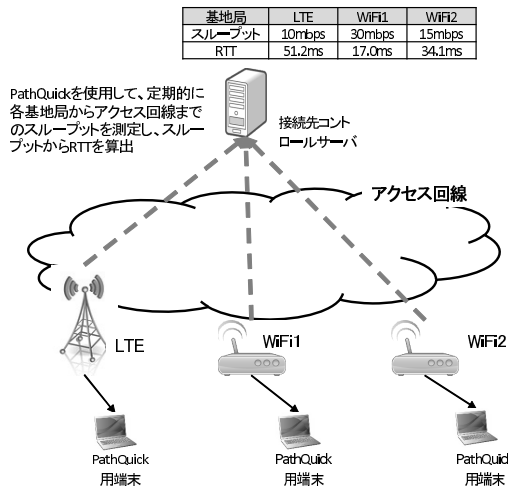


図 3 PathQuick を使用した RTT 算出のシステム構成
 Fig. 3 System configuration to calculate RTT with PathQuick.

4.1 接続時 RTT 取得部

本研究では、各端末が各基地局に接続した場合の接続時 RTT を把握するために、PathQuick を使用して各基地局における RTT を定期的に把握する。

PathQuick を使用した接続時 RTT 取得のシステム構成を図 3 に示す。各基地局に PathQuick 用の端末を常時接続させておく。また、アクセス回線側には、接続先コントロールサーバを設置する。各基地局に接続した PathQuick 用端末から、接続先コントロールサーバに対して定期的にパケットを送信する。接続先コントロールサーバは、受信したパケットの受信間隔をもとに、各基地局からアクセス回線へのスループット (T_i) を定期的に把握し、スループットを元に式 (3) を使用して、各基地局の接続時 RTT を算出する。

4.2 接続先決定部

あるエリアで接続可能な基地局 (LTE もしくは WiFi) として、 sa, sb, sc があるとして、それぞれの収容可能数を x, y, z とする。全体収容数 m は、以下の式 (5) で求められる。

$$m = x + y + z \tag{5}$$

また、同エリアに存在している端末を、 t_1, t_2, \dots, t_n とする。全体収容数 m から端末数 n 個だけ抽出したアクセスポイントと、 n 個の端末において、各基地局に対する各端末の RTT ギャップをもとに、最適な基地局と端末の組み合わせを算出する。

このとき、各端末における必要 RTT は、各端末で使用されているアプリケーションをもとに表 2 から算出する。また、RTT ギャップの計算に使用される接続時 RTT は、接続時 RTT 取得部によって定期的に取得された RTT、およびその後に対象基地局に接続された端末数をもとに、式 (4) に従って算出される。これらの接続時 RTT および必要

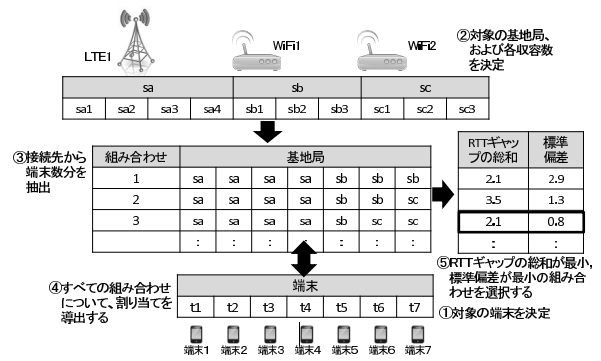


図 4 接続先決定ロジックの流れ
 Fig. 4 Determination of a base station to be connected.

RTT をもとに、RTT ギャップを算出する。なお、ここで RTT ギャップがマイナスのときは、必要 RTT よりも接続時 RTT の方が小さい値になり、ユーザが体感するレスポンスタイムは自身が望むものよりも短くなるため、実質的に RTT ギャップが 0 の場合と同等として考えることができる。すなわち、RTT ギャップのマイナスの値が大きくなることは、システム全体の利用効率には寄与しないため、ここではマイナスの値をすべて 0 に置き換える。また、アプリケーションの種類が「その他」の場合、表 2 により必要 RTT は「制限なし」となるが、これは接続時 RTT の値に寄らず、必ず必要 RTT が満たされることを意味するため、RTT ギャップは 0 とする。

全体収容数 m から、端末数 n を抽出するすべての組み合わせについて、同様の計算を行う。すべての組み合わせで算出された解のうち、RTT ギャップの総和が最小となるものを、全体の最適解として選択する。ここで、複数の最適解が得られた場合は、標準偏差が一番小さい解を選択する。接続先決定ロジックの流れを図 4 に示す。なお本研究では、上記の最適解の算出において、割り当て問題の手法の 1 つであるハンガリアン法を使用する。

4.3 割り当て問題 (ハンガリアン法)

本節では、本研究で使用するハンガリアン法について解説する。

4.2 節で述べた、 n 個だけ抽出したアクセスポイントと、 n 個の端末の、それぞれの組み合わせにおける RTT ギャップを、サイズ $n \times n$ の行列で表すことができる。これを割り当て問題におけるコスト行列と見なす。ここでコスト行列の各行は各アクセスポイントを表し、各列は各端末を表している。本研究で使用するハンガリアン法は、与えられたコスト行列に対して以下の手順を施すことによって、割り当て問題を解く手法である。

- (1) 与えられた行列 (図 5①) に対して、各行の各要素からその行の最小値を引き (図 5②)、さらに各列の各要素からその列の最小値を引く (図 5③)。
- (2) すべての 0 をできるだけ少ない数の縦または横の線で

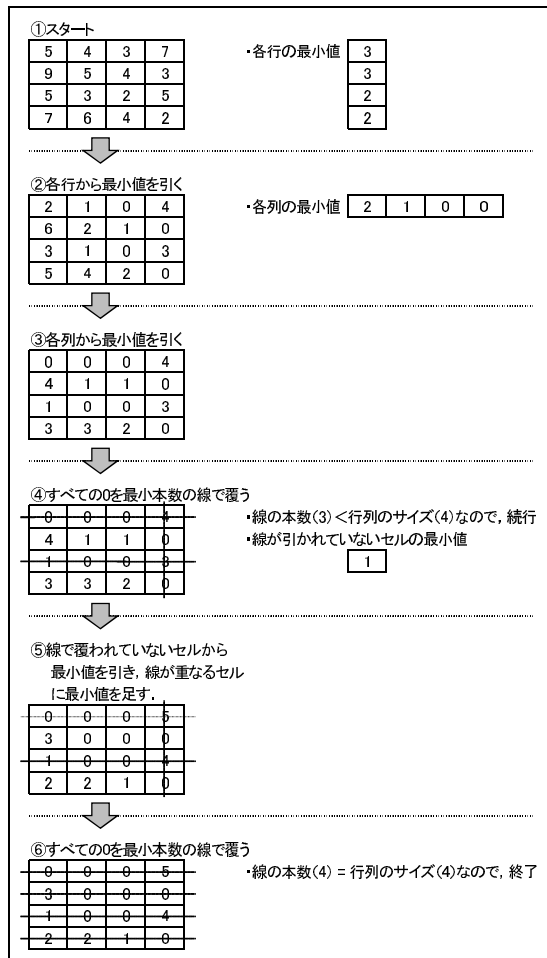


図 5 ハンガリアン法の計算の流れ
Fig. 5 The Hungarian method.

覆う (図 5④, ここでは, 3 本の線ですべての 0 を覆うことができる). このとき引いた線の本数が, 行列の大きさ (図 5 の場合は 4) と同じか, それよりも大きい場合は, 各行各列から 0 を 1 つずつ選ぶことができるため, 処理を終了する.

(3) (2) で引いた線の本数が, 行列の大きさよりも小さい場合, 線が引かれていない要素から, 線が引かれていない要素の最小値を引く. また, 線が重なっている要素に, 線が引かれていない要素の最小値を足す (図 5⑤). 以後, 終了するまで (2), (3) を繰り返す. 以上の操作により, 重みを最小化とする組み合わせを導出することができる.

本研究では, 各端末の各アクセスポイントに対する RTT ギャップをコスト行列とし, RTT ギャップを最小化する組み合わせを, ハンガリアン法を用いて導出する.

4.4 端末制御部

4.2 節にて算出された組み合わせをもとに, 接続先コントロールサーバから各端末へ制御情報を送信する. 各端末は, 受信した制御情報に従って, 接続先の基地局を切り替

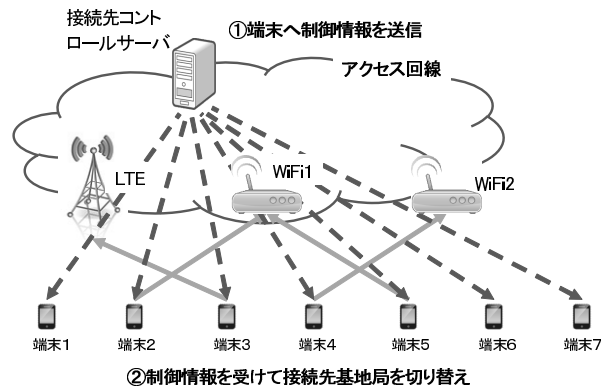


図 6 端末制御のイメージ
Fig. 6 Scheme of controlling mobile terminals.

える. 端末制御のイメージを, 図 6 に示す.

5. シミュレーション実験による評価

5.1 実験の概要

4 章で述べた提案システム全体のうち, 接続先決定部についてシミュレーションプログラムを作成し, 実験を行った.

今回の実験においては, 新たに接続される端末数が 100 台の場合 (実験 1) と 10 台の場合 (実験 2) のそれぞれで, 接続時 RTT の初期値, RTT 増分, および 1 基地局あたりの収容可能残数の組み合わせにより実験を行った. ここで「収容可能残数」は, 1 基地局あたり残り何台の端末を収容可能かを示す値である. 1 基地局あたりの収容可能残数が端末数よりも大きい値の場合は, すべての端末を 1 つの基地局に収容することが可能であり, 実質的に収容可能数による制限がない状態といえる. 1 基地局あたりの収容可能残数が小さくなるに従い, 本来接続したい基地局に接続できない端末が増えることになる. ただし, どの基地局にも接続できない端末が発生しないように, 今回の実験においては, すべての基地局の収容可能残数の総和は, 端末数よりも大きい値を取るようにした.

実験を行った各ケースの概要を表 3 および表 4 に示す. いずれも, 割り当て先となる基地局数は 3 つとした.

なお, 接続時 RTT の初期値 RTT_{init} は, PathQuick によって直近に取得された RTT の当該基地局の値 RTT_{pa} , 当該基地局の RTT 関数 $f(x)$, および PathQuick 取得時からの接続端末数の増減 $term_{diff}$ により, 式 (6) で示される.

$$RTT_{init} = RTT_{pa} + f(term_{diff}) \quad (6)$$

ここでは便宜上, 各基地局の RTT 関数 $f(x)$ を 1 次関数と見なしシミュレーションを行った. 表 3 および表 4 の RTT 増分は, $f(x)$ の傾きに相当する.

各端末で使用しているアプリケーションとしては, 「通話アプリケーション」「ブラウザ」「その他」のうちのいずれかをランダムに割り当てた. また, 各アプリケーション

表 3 実験 1 の概要

Table 3 Conditions of Experiment 1.

| ケース名 | RTT 初期値 (ms) | | | RTT 増分 (ms) | 1 基地局あたりの 収容可能残数 (台) |
|-----------|--------------|-------|-------|-------------|----------------------|
| | 基地局 1 | 基地局 2 | 基地局 3 | | |
| case1-1-1 | 20 | 40 | 60 | 1 | 40 |
| case1-1-2 | 20 | 40 | 60 | 1 | 70 |
| case1-1-3 | 20 | 40 | 60 | 1 | 100 |
| case1-2-1 | 40 | 60 | 80 | 1 | 40 |
| case1-2-2 | 40 | 60 | 80 | 1 | 70 |
| case1-2-3 | 40 | 60 | 80 | 1 | 100 |
| case1-3-1 | 60 | 80 | 100 | 1 | 40 |
| case1-3-2 | 60 | 80 | 100 | 1 | 70 |
| case1-3-3 | 60 | 80 | 100 | 1 | 100 |
| case1-4-1 | 80 | 100 | 120 | 1 | 40 |
| case1-4-2 | 80 | 100 | 120 | 1 | 70 |
| case1-4-3 | 80 | 100 | 120 | 1 | 100 |
| case2-1-1 | 20 | 40 | 60 | 2 | 40 |
| case2-1-2 | 20 | 40 | 60 | 2 | 70 |
| case2-1-3 | 20 | 40 | 60 | 2 | 100 |
| case2-2-1 | 40 | 60 | 80 | 2 | 40 |
| case2-2-2 | 40 | 60 | 80 | 2 | 70 |
| case2-2-3 | 40 | 60 | 80 | 2 | 100 |
| case2-3-1 | 60 | 80 | 100 | 2 | 40 |
| case2-3-2 | 60 | 80 | 100 | 2 | 70 |
| case2-3-3 | 60 | 80 | 100 | 2 | 100 |
| case2-4-1 | 80 | 100 | 120 | 2 | 40 |
| case2-4-2 | 60 | 80 | 100 | 2 | 70 |
| case2-4-3 | 60 | 80 | 100 | 2 | 100 |

表 4 実験 2 の概要

Table 4 Conditions of Experiment 2.

| ケース名 | RTT 初期値 (ms) | | | RTT 増分 (ms) | 1 基地局あたりの 収容可能残数 (台) |
|-----------|--------------|-------|-------|-------------|----------------------|
| | 基地局 1 | 基地局 2 | 基地局 3 | | |
| case3-1-1 | 100 | 120 | 140 | 1 | 4 |
| case3-1-2 | 100 | 120 | 140 | 1 | 7 |
| case3-1-3 | 100 | 120 | 140 | 1 | 10 |
| case3-2-1 | 120 | 140 | 160 | 1 | 4 |
| case3-2-2 | 120 | 140 | 160 | 1 | 7 |
| case3-2-3 | 120 | 140 | 160 | 1 | 10 |
| case3-3-1 | 140 | 160 | 180 | 1 | 4 |
| case3-3-2 | 140 | 160 | 180 | 1 | 7 |
| case3-3-3 | 140 | 160 | 180 | 1 | 10 |
| case3-4-1 | 160 | 180 | 200 | 1 | 4 |
| case3-4-2 | 160 | 180 | 200 | 1 | 7 |
| case3-4-3 | 160 | 180 | 200 | 1 | 10 |
| case4-1-1 | 100 | 120 | 140 | 2 | 4 |
| case4-1-2 | 100 | 120 | 140 | 2 | 7 |
| case4-1-3 | 100 | 120 | 140 | 2 | 10 |
| case4-2-1 | 120 | 140 | 160 | 2 | 4 |
| case4-2-2 | 120 | 140 | 160 | 2 | 7 |
| case4-2-3 | 120 | 140 | 160 | 2 | 10 |
| case4-3-1 | 140 | 160 | 180 | 2 | 4 |
| case4-3-2 | 140 | 160 | 180 | 2 | 7 |
| case4-3-3 | 140 | 160 | 180 | 2 | 10 |
| case4-4-1 | 160 | 180 | 200 | 2 | 4 |
| case4-4-2 | 160 | 180 | 200 | 2 | 7 |
| case4-4-3 | 160 | 180 | 200 | 2 | 10 |

における必要 RTT は、表 2 の値を使用した。

シミュレーションプログラムでは、これらの値をもとに、各基地局の収容数全体から端末数分を抽出しうるすべての組み合わせに対して、ハンガリアン法による計算を行い、全組み合わせの中で RTT ギャップの合計が最小になるものの中で、標準偏差が最小になるものを出力している。

また本実験では、提案システムでの計算（解法 1）以外に、以下の 2 つのロジックについても、各ケースにおける計算を行った。

- (1) 一番短い RTT を必要とする端末から順番に、現時点で接続時 RTT が一番短い基地局に優先的に割り当てる（グリーディ法）（解法 2）。
- (2) 各端末をランダムに各基地局に割り当てる（解法 3）。

5.2 実験の評価

5.2.1 RTT ギャップの平均

実験 1 における各ケース・各解法の RTT ギャップの平均を表 5 および図 7 に示す。

すべてのケースにおいて、3 つの解法のうち解法 1（本提案システム）の RTT ギャップ平均値が、一番小さい値を取っている。

解法 2 は、RTT 増分が小さくかつ収容残数が小さいケー

表 5 実験 1 における RTT ギャップの平均

Table 5 Average RTT gap by Experiment 1.

| ケース名 | RTT ギャップの平均 (ms) | | | ケース名 | RTT ギャップの平均 (ms) | | |
|-----------|------------------|-------|-------|-----------|------------------|-------|-------|
| | 解法 1 | 解法 2 | 解法 3 | | 解法 1 | 解法 2 | 解法 3 |
| case1-1-1 | 0.00 | 0.00 | 1.44 | case2-1-1 | 0.44 | 5.40 | 9.30 |
| case1-1-2 | 0.00 | 1.80 | 2.55 | case2-1-2 | 0.00 | 27.00 | 9.84 |
| case1-1-3 | 0.00 | 12.60 | 2.08 | case2-1-3 | 0.00 | 54.60 | 7.00 |
| case1-2-1 | 0.00 | 0.00 | 3.31 | case2-2-1 | 6.12 | 12.60 | 14.86 |
| case1-2-2 | 0.00 | 9.00 | 5.65 | case2-2-2 | 1.40 | 34.20 | 15.38 |
| case1-2-3 | 0.00 | 19.80 | 4.24 | case2-2-3 | 1.40 | 67.80 | 14.76 |
| case1-3-1 | 2.98 | 5.40 | 13.90 | case2-3-1 | 13.32 | 19.80 | 22.48 |
| case1-3-2 | 0.66 | 16.20 | 8.98 | case2-3-2 | 11.16 | 41.40 | 22.38 |
| case1-3-3 | 0.66 | 27.00 | 8.51 | case2-3-3 | 11.16 | 81.00 | 23.10 |
| case1-4-1 | 10.18 | 12.60 | 18.14 | case2-4-1 | 20.52 | 27.00 | 29.62 |
| case1-4-2 | 7.78 | 23.40 | 16.56 | case2-4-2 | 20.44 | 54.60 | 29.78 |
| case1-4-3 | 7.78 | 34.20 | 17.05 | case2-4-3 | 20.44 | 94.20 | 28.98 |

スでは RTT ギャップ平均値も小さいが、RTT 増分が大きい、もしくは収容残数が大きい場合には RTT ギャップ平均値が大きくなる傾向がある。これは、解法 2 が現時点での RTT 値をもとに接続先を判断しているからである。しかし実際には、接続端末数によって RTT が変動するため、結果として得られる RTT ギャップ平均値は大きくなる。これに比べて、解法 1（本提案システム）は、取り得るすべての組み合わせに対して、割り当て後の RTT 値も考慮して最適な組み合わせを抽出しているため、RTT ギャップ平均値が一番小さい値を取るようになる。解法 3 と比べ

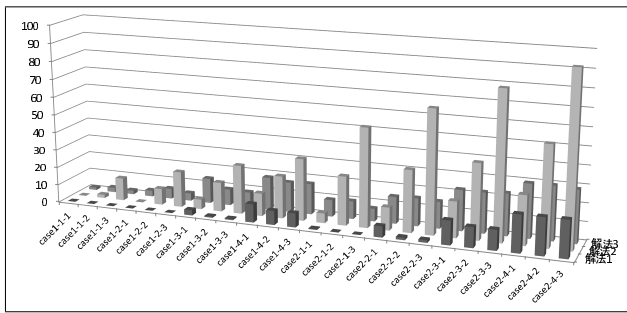


図 7 実験 1 における RTT ギャップの平均 (グラフ)

Fig. 7 Average RTT gap by Experiment 1 (Graph).

表 6 実験 2 における RTT ギャップの平均

Table 6 Average RTT gap by Experiment 2.

| ケース名 | RTT ギャップの平均 (ms) | | | ケース名 | RTT ギャップの平均 (ms) | | |
|-----------|------------------|------|------|-----------|------------------|------|------|
| | 解法 1 | 解法 2 | 解法 3 | | 解法 1 | 解法 2 | 解法 3 |
| case3-1-1 | 5.4 | 5.7 | 11.5 | case4-1-1 | 6.3 | 6.9 | 16.7 |
| case3-1-2 | 5.4 | 6.6 | 9.4 | case4-1-2 | 6.3 | 8.7 | 11.1 |
| case3-1-3 | 5.4 | 7.5 | 7.5 | case4-1-3 | 6.3 | 10.5 | 16.9 |
| case3-2-1 | 11.4 | 11.7 | 15.6 | case4-2-1 | 12.3 | 12.9 | 18.5 |
| case3-2-2 | 11.4 | 12.6 | 11.7 | case4-2-2 | 12.3 | 14.7 | 16.3 |
| case3-2-3 | 11.4 | 13.5 | 15.4 | case4-2-3 | 12.3 | 16.5 | 14.5 |
| case3-3-1 | 17.4 | 17.7 | 19.3 | case4-3-1 | 18.3 | 18.9 | 22.7 |
| case3-3-2 | 17.4 | 18.6 | 23.5 | case4-3-2 | 18.3 | 20.7 | 18.9 |
| case3-3-3 | 17.4 | 19.5 | 25.6 | case4-3-3 | 18.3 | 22.5 | 22.3 |
| case3-4-1 | 23.4 | 23.7 | 30.3 | case4-4-1 | 24.3 | 24.9 | 27.7 |
| case3-4-2 | 23.4 | 24.6 | 28.3 | case4-4-2 | 24.3 | 26.7 | 31.7 |
| case3-4-3 | 23.4 | 25.5 | 24.3 | case4-4-3 | 24.3 | 28.5 | 33.5 |

ると、すべてのケースで解法 1 のほうが安定的により小さい値を取っている。これらのことから、RTT ギャップの最小化において本提案システムが有効であることが確認できた。

しかし現実的には、一度の割り当て計算で対象になる端末数が 100 台までになるケースは、少ないと考えられる。次に実験 2 における各ケース・各解法の RTT ギャップの平均を表 6 に示す。実験 2 においては、対象台数は 10 台であるが、これを見ると、台数が少ない場合でも、すべてのケースにおいて解法 1 が他の解法よりも短い値を取っている。これにより、対象台数が少ない場合でも、RTT ギャップの最小化において本提案システムが有効であることが確認できた。

5.2.2 基地局割り当てに要する処理時間

実験 1 における解法 1 で与えられるコスト行列のサイズは 100 × 100 であり、計算回数 (図 4 の④に相当するハンガリアン法の実施回数) は、最大で 5,151 回である。本実験では、次の実験環境において処理を行った。

- OS : Windows7 64 bit
- CPU : Intel Corei7 3.50 GHz
- メモリ : 16.0 GB

また、プログラミング言語としては、C++を使用した。

本実験において、実験 1 における解法 1 の処理時間はすべてのケースで 1 秒以下であった。これらの値は、ユーザがある一定時間以上、同じアプリケーションを使用し続け

る状況においては、十分に有効な値であると考えられる。これらのことから、処理時間の観点からも本提案システムが有効であることが確認できた。

6. まとめと今後の課題

ユーザが使用しているアプリケーションを考慮した RTT ギャップについて定義し、RTT ギャップを低減させる接続先決定ロジックを割り当て問題として定式化した。また、ハンガリアン法を用いた接続先決定システムを提案し、シミュレーションプログラムによる実験を行い、ハンガリアン法を用いない場合と比較して、RTT ギャップの最小化、処理時間の 2 つの観点からその有効性を示した。

今後は、複数の端末の接続や離脱が連続して発生するような実際の環境において、本提案システムの有効性を評価する。また、「接続時 RTT 取得部」、「端末制御部」についてもシミュレーションを行い、全体システムの評価を行う予定である。

謝辞 本研究を進めるにあたり、熱心に多大なるご指導を賜りました創価大学の勅使河原可海名誉教授に深く感謝し、心より御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 平井弘実, 山口実靖, 小口正人: スマートフォンの無線 LAN 接続時における周辺端末からの情報に基づく協調帯域制御ミドルウェアの提案と実装, 情報処理学会論文誌, Vol.55, No.1, pp.340-353 (2014).
- [2] 西川由明, 大芝 崇, 金友 大, 中島一彰: 無線リンクの高負荷状態におけるアプリケーションレベル通信遅延低減方式の評価実験, 情報処理学会研究報告, Vol.2013-MBL-66, No.24, pp.1-6 (2013).
- [3] 総務省: アナログ電話相当の機能を有する IP 電話用設備に係る現行技術基準 (1), available from (http://www.soumu.go.jp/main_content/000158162.pdf).
- [4] Forrester Consulting: eCommerce Web Site Performance Today, available from (http://www.damcogroup.com/white-papers/e-commerce_website_perf_wp.pdf).
- [5] 里田浩三, 大芝 崇, 吉田裕志: サービス品質向上のためのネットワーク状態推定・予測技術, 電子情報通信学会技術報告, CQ2013-56, Vol.113, No.293, pp.29-34 (2013).
- [6] 森村英典, 牧野都治, 真壁 肇, 杉山高一: 統計・OR 活用辞典, 東京書籍株式会社 (1984).
- [7] 伊理正夫, 今野 浩, 刀根 薫: 最適化ハンドブック, 朝倉書店 (1995).
- [8] Alan Doran, Joan Aldous: よくわかるネットワークアルゴリズム, 日本評論社 (2003).
- [9] Ahuja, R.K., Magnanti, T.L. and Orlin, J.B.: NETWORK FLOWS: Theory, algorithms, and Applications, Prentice Hall (1993).
- [10] 齊藤智也, 稲井 寛: 無線 LAN における動的アクセスポイント選択方式, 電子情報通信学会技術報告, NS2003-138, Vol.103, No.386, pp.33-36 (2003).
- [11] 阿部貴充, 福田 豊, 尾家祐二: Wireless LAN におけるアクセスポイント選択方式の提案とその評価, 電子情報通信学会技術報告, IN2002-206, Vol.102, No.693, pp.23-28 (2003).
- [12] Kasbekar, G.S., Nuggehalli, P. and Kuri, J.: Online Client-AP Association in WLANs, 2006 4th Interna-

tional Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks, pp.1-8 (2006).

- [13] Gong, H., Nahm, K. and Kim, J.: Distributed Fair Access Point Selection for Multi-Rate IEEE 802.11 WLANs, *5th IEEE Consumer Communications and Networking Conference*, pp.528-532 (2008).
- [14] 竹内彰次郎, 瀬崎 薫, 安田靖彦: IEEE802.11e WLAN network におけるアクセスポイント選択手法, 電子情報通信学会論文誌 (B), Vol.J89-B, No.4, pp.431-442 (2006).
- [15] 武智竜一, 岡村亜紀子, 中津川恵一, 浜野有一朗, 佐藤康行: モバイルネットワークにおける最適経路制御, 電子情報通信学会論文誌 (B), Vol.J89-B, No.2, pp.195-203 (2006).
- [16] 森岡康史, 東野武史, 塚本勝俊, 小牧省三: 異種サービス混在環境における無線 LAN アクセスポイント選択アルゴリズム, 情報処理学会論文誌, Vol.50, No.2, pp.750-764 (2009).



亀田 栄一 (正会員)

1974 年生. 1997 年創価大学工学部情報システム学科卒. 1999 年東京工業大学大学院修士課程了, 2002 年 CEN ソリューションズ (株), 現在ネットワーク利用の研究に従事. 電子情報通信学会会員.



篠宮 紀彦 (正会員)

1972 年生. 1995 年創価大学工学部情報システム学科卒業. 1997 年同大学院工学研究科情報システム学専攻博士前期課程修了. 2001 年同大学院博士後期課程修了, 博士 (工学). 2000 年 (株) 富士通研究所ネットワークシステム研究所入社. IP ネットワークおよびフォトニックネットワーク設計技術の研究に従事. 2005 年創価大学工学部専任講師. 現在, 同大学教授. 自律分散ネットワークの設計と制御技術, 光ファイバセンサネットワーク, グラフ・ネットワーク理論等の研究に従事. 2014 年テキサス大学客員研究員. 国際会議にて 5 件の Best Paper Award を受賞, 2006 年 IARIA ICSEA, 2010 年 IEEE ICUMT, 2014 年 IARIA ICONS, 2015 年 IARIA ICN. 2012~2013 年 IEEE CAS Society Japan Chapter Secretary. IEEE, 電子情報通信学会, 電気学会各会員.