

移動予定経路情報を用いた 空間的モバイルデータオフローディング手法の提案

山形 英輝^{1,a)} 木谷 友哉^{2,b)}

概要: モバイル端末の普及に伴い、携帯電話基地局を使うモバイルデータ通信量が急増している。車両は移動性が高く、カーナビなどに移動予定が入力されている場合、移動予定を利用してルーティングを行うことにより、低負荷な基地局への効率的なオフローディングができると考えられる。そこで、完全な移動予定を取得可能である場合のオフローディングの成功率の上界を調査するため、都市部の 5km 四方のエリアについてシミュレーションによる基礎的な評価を行った。結果、データの許容遅延時間 10 分、セル半径 1km、車両の通信半径 40m としたとき、実交通流の 1/40 の車両密度であっても 9 割の確率でオフローディング経路が存在することがわかった。

1. はじめに

総務省の情報通信データベース [1] の集計値に基づく、月平均トラフィック量は 2015 年からの 1 年間で 1.4 倍に増大している。モバイルデータ通信量の増加によって携帯電話基地局に負荷が集中すると、通信の品質は低下する。これに対し、携帯電話キャリア各社は基地局の増強などを行っている。しかし、建築コストの増大や有限の電波資源の枯渇という大きな問題を抱えている。

そこで各社は、コンビニエンスストアや飲食店などに WiFi アクセスポイント (WiFi AP) を設置し、ユーザに対して WiFi AP の利用を推奨することで携帯電話基地局網を流れるデータの負荷低減 (オフローディング) を図っている。数 km に及ぶ携帯電話基地局のエリアに比べて、WiFi オフローディングスポットとなる WiFi AP の通信範囲は高々数十 m 程度であり、また、WiFi AP の設置数も限られているため、十分な効果を上げているとは言えない。

モバイルデータオフローディングとは、携帯電話基地局を使うモバイルデータ通信のうち、ある程度の遅延が許容される通信を対象に通信トラフィックを分散するための手法である [2]。モバイルデータオフローディングの例として、すぐに通信を行わずに基地局の比較的空いている時間を使ってモバイル通信を行って通信量のピークシフトを行う方法や、先述した WiFi スポットに立ち寄った際にデータ通信を行うことで基地局との通信量を減らすといった方

法が挙げられる。

また、混んでいる基地局の近隣の基地局が空いている場合に、アドホックネットワークにより空いている基地局まで基地局を使わずにデータの中継し、空いている基地局を用いてモバイルデータ通信ができるのであれば、これもオフローディングといえる。筆者らはこれを空間的オフローディングと呼んでいる。しかし、携帯電話の基地局セルのサイズは直径数 km と長く、近隣の空いているセルまでデータをアドホックネットワークを用いて中継するには不確定要素が多く、目的地までデータが到達する信頼性が低い。

また、モバイルデータ通信はダウンロードデータが主であるが、データダウンロードを近隣セルの基地局から行うためには、そのセルにいる他の車両からデータを要求する車両への中継が必要となる。WiFi スポットや近隣のセルの基地局のような位置が固定された宛先であっても車々間アドホックネットワーク (VANET) での通信は信頼性が低く、データの宛先が移動中の車両となるダウンロード時の空間的オフローディングはさらに信頼性が低くなる。

本稿では、各セル毎にオフローディングを制御するための専用サーバを設置すること、通信ノードとしてカーナビゲーションシステムに目的地が設定された車両のように、移動性が高く、かつ移動予定がある程度決まっているものを想定する。この想定のもとで、ノードの移動を利用して、空いている近隣の別の基地局へデータをオフローディングする空間的オフローディングの手法を提案する。

¹ 静岡大学 大学院総合科学技術研究科

² 静岡大学 学術院情報学領域

a) h-yamagata@kitanilab.org

b) t-kitani@kitanilab.org

2. 関連研究

モバイルデータオフローディングの手法について、文献 [2] では3つのカテゴリに分類している。

1つ目は、モバイルデータの送受信時間を遅らせることで、基地局の通信負荷のピークを避ける時間的オフローディングである。この関連研究として、Mehmeti らは送受信時間のスケジューリングについて有効性を解析している [3]。また、Lu らは複数の端末がそれぞれ基地局に接続して通信するのではなく、近隣の通信ノードがアドホック通信で協調して、代表ノードがデータを集約して基地局と通信することで基地局の負荷を低減するようなことも提案している [4]。

2つ目は、データを基地局ではなく WiFi スポットを経由して通信することによる通信路的オフローディングである。Wang らは、移動ノードを車としたとき、ユーザの満足度を最大化し、同時に WiFi AP を用いてオフローディングする手法を提案している [5]。ユーザの満足度は遅延が短く、通信コストが小さいほど大きいと考える。このとき、ただちに利用可能だが通信コストがかかる携帯電話網か、または実質的にコストはかからないが遭遇までの待ち時間を必要とする WiFi AP のいずれを用いるべきかを、WiFi AP との遭遇履歴に基づき適応的に決定する。政野らは、東京都市圏の実際の WiFi AP の位置情報と現実的な車のモビリティモデルを用いて、WiFi へのオフローディングをシミュレーションによって評価している [6]。パーソントリップ調査による車両のモビリティモデルと、実際の通信キャリアが設置した WiFi スポットの位置情報から VANET を用いた WiFi オフローディングの効果について評価し、中継車両数を1ホップまでとした場合、ホップしないときに比べて遅延時間は2~14%程度短縮されるが、一方で2ホップ以上では遅延時間の短縮は認められなかったと報告している。

3つ目は、混んでいる携帯電話基地局の近隣の基地局が空いている場合に、車両によってそこまで移動した後にモバイル通信を行うことで、混んでいる基地局の負荷を低減する空間的オフローディングである。WiFi オフローディングでは、WiFi スポットの通信範囲が限られているため遭遇頻度が低かったり、通信可能時間が短かったり、そもそも WiFi スポットや RSU が少ないことなどから効果は限定的である。そのため、近隣の基地局を使うことは安定したモバイル通信が実現できるために有望であるが、次のような理由から既存研究が少ない。モバイルデータ通信はダウンロードデータが主であるが、データダウンロードを近隣セルの基地局から行うためには、そのセルに居る他の車両からの中継が必要となる。携帯電話基地局のセルの大きさは、WiFi スポットの大きさに比べると十分大きいた

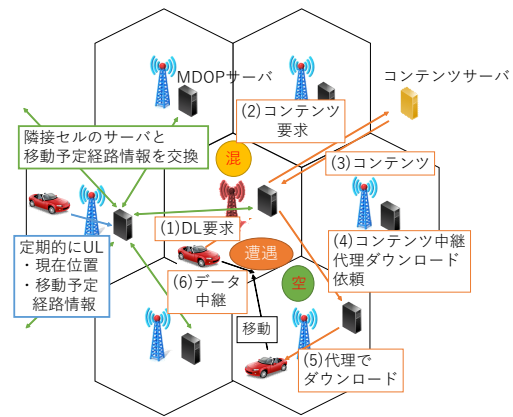


図1 提案する空間的オフローディング手法の概念図

め、近隣のセルへの移動には長い距離が予想される。長い距離の複数車両による Carry & Forward でのデータ通信は不確実性が大きい。

本稿では、アップロードデータおよびダウンロードデータについて、VANET を用いて空間的オフローディングを実現する手法について提案する。

3. 提案する空間的オフローディング手法

3.1 想定するモバイルデータオフローディング環境

本稿では、MDOP[2] をもとに、マルチホップに対応した空間的オフローディングを実現する通信手法について提案する。MDOP では、通信環境として次のような仮定を置いている。MDOP を実現するためのサーバが設置されており、遅延耐性のあるデータの経路選択は MDOP サーバを通じて行われるとする。また、MDOP サーバは各基地局の混雑状況を得られるとする。

今回、空間的オフローディングを実現するに当たって、さらに次の仮定を置く。各通信ノードは主として車両または車両に乗った一般ユーザを想定し、セルをまたぐような移動が発生する移動性の高いノードを対象とする。または、鉄道やバス、ナビゲーションアプリに目的地が設定されたノードであり、未来の移動予定が把握できているとする。ユーザ端末 (UE) がアップロードまたはダウンロードを要求する際に MDOP サーバに送る UE_Info (現在位置と接続中の基地局 ID) に、移動予定経路情報 (時刻、緯度、経度の3つ組の列) を含めるものとする。これ以外にも、MDOP サーバは各セル内の通信ノードの移動予定経路情報を制御情報として定期的に収集し、管理しているとする。また、MDOP サーバは基地局セルごとに設置されており、近隣の6セルの MDOP サーバとは有線接続によって通信が可能であり、セルの混雑状況と各通信ノードの移動予定経路情報をそれぞれ交換し共有しているとする (図1)。

3.2 空間的オフローディング通信プロトコルの基本設計

ここではまず、通信ノードからインターネット上のサー

バへ大きなデータをアップロードする場合の空間的オフローディングプロトコルを示す。次に、逆にインターネット上のサーバから大きなデータを通信ノードへダウンロードする場合の空間的オフローディングプロトコルを示す。

モバイルデータ通信はその多くがダウンロードである。しかし、従来のモバイルデータオフローディングの研究ではアップロード方向の手法の提案は多いが、ダウンロード方向については十分研究されていない。その理由として、アップロード方向では受信先が携帯電話基地局、WiFi スポット、路側機 (RSU: Road Side Unit) のように固定されているが、ダウンロード方向では受信先が移動ノードであるために、車車間通信ネットワークのようなアドホック通信ではルーティングが困難なことが挙げられる。

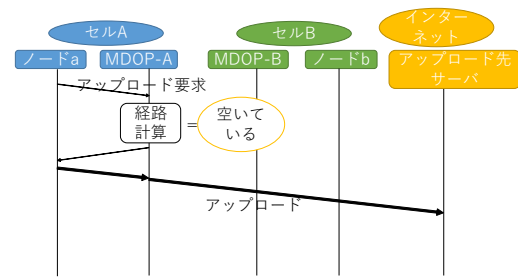
提案手法では、携帯基地局セル毎に用意された MDOP サーバが、圏内の移動ノードの移動予定経路を管理することで実現する手法を検討する。

以下の説明では、要求を出す通信ノード a がいるセルをセル A 、セル A の MDOP サーバを $MDOP-A$ 、セル A に隣接しモバイルデータ通信が空いているセルをセル B 、セル B の MDOP サーバを $MDOP-B$ とする。各セル内の通信ノードは、まずそのセルの MDOP サーバに通信要求を送る。

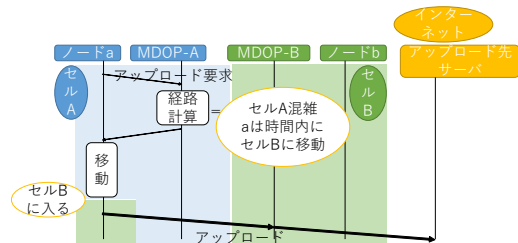
3.2.1 アップロードデータのオフローディング

セル A の通信ノード a が、インターネット上のサーバへ大きなデータをアップロードする場合、次の5つに場合分けが可能である。以降で必要となる、許容時間内に通信ノード a からセル B へ達する経路が存在するか否かを判定するアルゴリズムについては、3.3 節にて後述する。

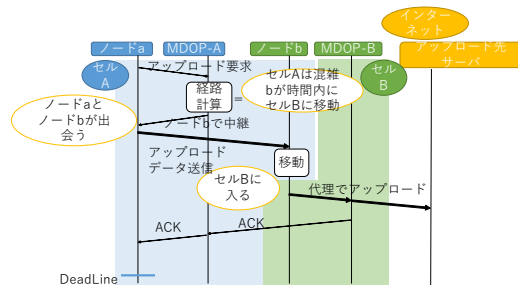
- (1) セル A のモバイルデータ通信が混雑していない場合は、時間的オフローディングを行い、セル A でモバイルデータ通信を行う (図 2(a)).
- (2) セル A が混雑しており、かつ、アップロードデータの許容時間内にその通信ノード a が空いている近隣のセル B へ移動する場合、 a は B へ移動後にモバイルデータ通信を行う (図 2(b)).
- (3) セル A が混雑しており、かつ、アップロードデータの許容時間内にその通信ノード a がアドホック通信で、空いている近隣のセル B へ移動する他ノード b と通信可能な場合、 a は b へデータを中継し、 b は B へ移動後にモバイルデータ通信を行う (図 2(c)).
- (4) (2)(3) において、データの許容時間以内にアップロードが完了した報告が a がない場合は、ただちに A でモバイルデータ通信を行う (図 2(d)).
- (5) セル A が混雑しているが、車車間通信をしても空いているセル B へデータをオフローディングすることが不可能な場合は、(1) と同様に A にてモバイルデータ通信を行う (図 2(e)).



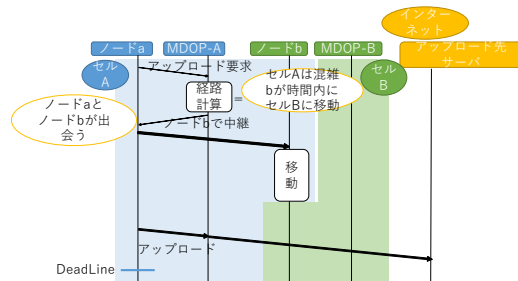
(a) セル A が空いている場合



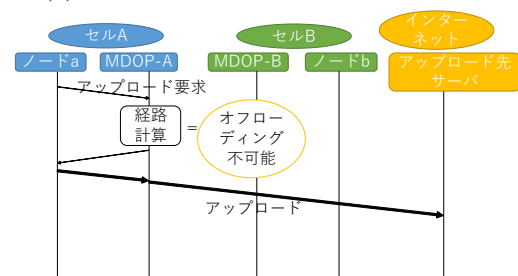
(b) 自ノードが Deadline までに空いているセルへ移動できる場合



(c) 他ノードによる中継ができる場合



(d) Deadline までに ACK が返ってこない場合



(e) 空間的オフローディングが不可能な場合

図 2 アップロード時の動作

3.2.2 ダウンロードデータのオフローディング

セル A の通信ノード a が、インターネット上のサーバから大きなデータをダウンロードする場合、次の4つに場合分けが可能である。

- (1) セル A のモバイルデータ通信が混雑していない場合、時間的オフローディングを行い、セル A でモバイル

データ通信を行う (図 3(a)).

- (2) セル A が混雑しており、かつ、ダウンロードデータの許容時間内に空いている近隣のセル B の通信ノード b が要求を出した a と移動して出会う場合、MDOP-A は MDOP-B を経由して b へ指令を出し、b は B でモバイルデータ通信でデータをダウンロードした後、移動またはアドホックネットワーク通信で a にデータを中継する (図 3(b)).
- (3) (2) において、データの許容時間以内にダウンロードデータが a に届かない場合は、a はただちにセル A でモバイルデータ通信を行う (図 3(c)).
- (4) セル A が混雑しているが、車車間通信をしても空いているセル B からデータをオフローディングすることが不可能な場合は、(1) と同様に A にてモバイルデータ通信を行う (図 3(d)).

3.3 移動予定経路情報を用いた時間軸付き隣接グラフによるオフローディング可否の判定

各携帯電話基地局セルに設置された MDOP サーバは、各セル内の通信ノードの移動予定経路情報 (時刻, 緯度, 経度の 3 つ組の列) を制御情報として定期的に収集し、管理する. また、近隣の 6 セルの MDOP サーバとは有線接続によって通信が可能であり、ネットワーク探索情報と各通信ノードの移動予定経路情報はそれぞれ交換し共有する. これにより、自セルを中心に 7 セル分の通信ノードについて、それぞれの時間帯で直接通信によるデータ交換が可能かどうかの判定を、位置情報と無線による直接通信可能範囲の大きさから得ることができるとする.

ある時刻 t において、通信ノード a と b が通信可能かどうかは、それぞれの時刻 t での各ノードの位置情報 $(x_{a,t}, y_{a,t})$, $(x_{b,t}, y_{b,t})$ と無線到達範囲 r から、

$$r > \sqrt{(x_{a,t} - x_{b,t})^2 + (y_{a,t} - y_{b,t})^2}$$

を満たすかどうかで判定できる. なお、この計算は MDOP サーバで行うため、ビルなどの構造物情報などを加味すれば精度を向上させることは可能である. これにより、時刻 t の通信ノード間の隣接グラフを得ることができる. なお、WiFi スポットや路側機 (RSU) についても移動しない通信ノードとして導入することが可能である.

次に、時刻を Δt 毎に分割し、各通信ノードの移動予定経路情報を元に位置情報から隣接性を計算し、隣接グラフを作る. Δt の粒度は、通信のネゴシエーション時間や帯域によって決められるべきである. また、細粒度であるとグラフサイズが大きくなりすぎるため、 $\Delta t = 5 \sim 10$ [sec.] 程度を下限として、その間ずっと接続可能であれば隣接していると判定するようにする. もっとも、移動予定経路情報は、時間が経つにつれて不正確な物になると考えられるため、その場合は隣接グラフの枝に重みをつけ、1 以下に

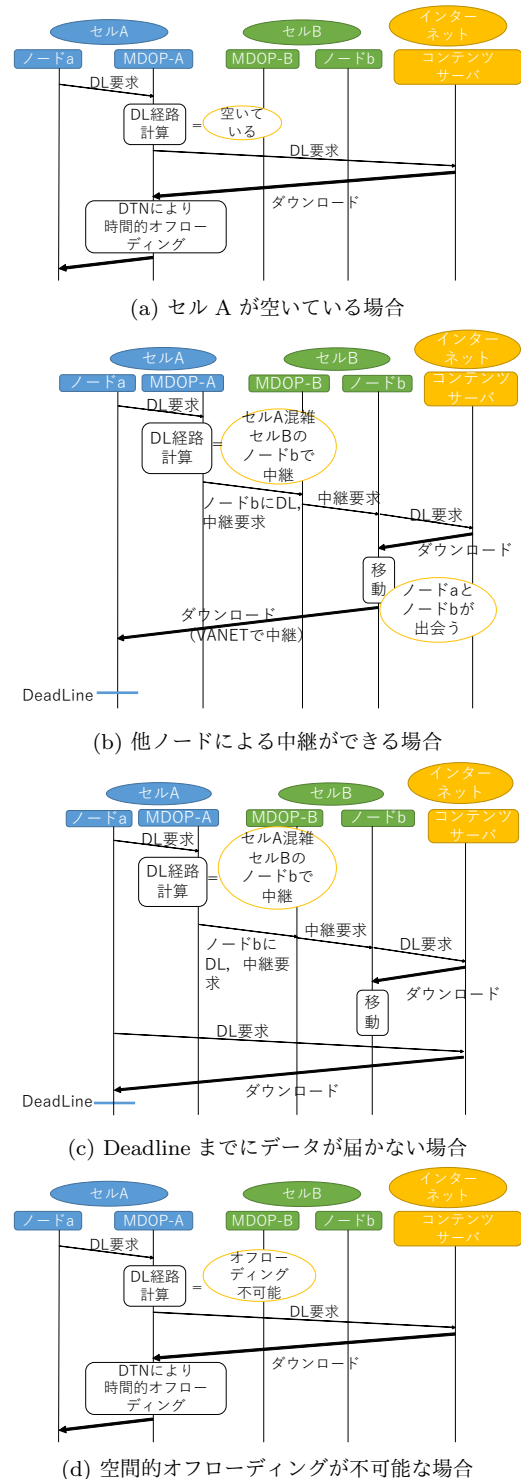


図 3 ダウンロード時の動作

することも考えられる.

次に、ある連続する時刻の隣接グラフ $G_{t+n\Delta t}$ と $G_{t+(n+1)\Delta t}$ について、有向辺を用いて同じ通信ノードを接続する. つまり、同じ通信ノードについては、時間をまたいでデータを保持できるため、有向辺を追加する. 時間を遡ってデータを渡すことはできないため、辺に時間と同じ向きをつける.

このようにして、図 4 のような時間軸付き隣接グラフが

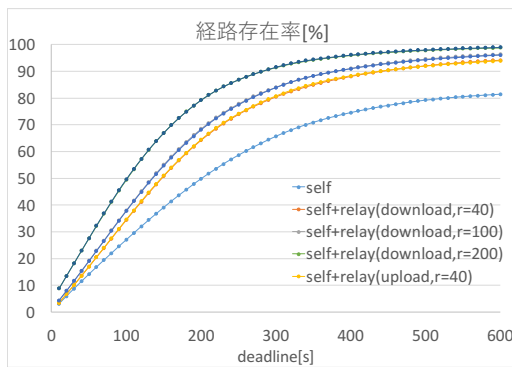


図 4 時間軸付き隣接グラフ

構成できる。有向辺を考慮して可達性判定を行えば、それらの通信ノード間でデータオフローディングが可能であることが判断できる。また、同じ時刻で長いホップ数のパスがあった場合、現実的に無限の距離の中継は難しいため、同一時間内であれば高々 2 ホップまでしか到達できないといった条件を導入すると、より現実を反映し、また、計算時間の削減につながる。

なお、各セルの大きさを直径 5km 程度とし、1セル辺りの移動可能な通信ノード数を 1 万台、ノード ID を 4 バイト、通信可能範囲を 100m とし、範囲内のノード数を高々 100 台以内とする。近傍 7セルのノードに対する隣接グラフはスパースであるため、各ノードが接続可能なノードを ID の列として保持した場合、1 万台×高々 100 台× 4 バイトで 4 メガバイトのデータサイズとなる。また時間軸の粒度を 5 秒とし、遅延許容時間を最大 1 時間とすると、レイヤは 720 となるため、全体で最大 2.88 ギガバイトのサイズとなり、MDOP サーバにとって十分扱える範囲である。

3.3.1 アップロード時の経路探索

アップロード時に、混雑しているセルにいる通信ノードのデータを、混雑していないセル内の通信ノードに中継して空間的オフローディングできるかどうかは、データの遅延許容時間内に前者から後者のノードへの可達性判定で判定できる。

図 4 を元に、混んでいるセル A の通信ノード a からのアップロードデータを、空いているセル B に空間的オフローディングすることを考える。現在時刻を t とし、遅延許容時刻を $t + 2\Delta t$ とする。このとき、時刻 t のノード a から、セル B に属するいずれかのノードへのパスが、遅延許容時刻までに見つかれば良い。例えば、

$$a_t \rightarrow b_t \rightarrow c_t \Rightarrow c_{t+\Delta t} \rightarrow d_{t+\Delta t}$$

で到達可能である。ここで \rightarrow はデータの中継を表し、 \Rightarrow は同一ノードによるデータの保持を表す。また、1 時刻以内の中継数を 1 ホップ以内に制限した場合でも

$$a_t \rightarrow b_t \Rightarrow b_{t+\Delta t} \rightarrow c_{t+\Delta t} \Rightarrow c_{t+2\Delta t}$$

で到達可能である。送信元の a は上記経路をアップロード

表 1 アップロード時のオフローディング経路情報

時刻	車	イベント	中継先
t	a	中継	車 b
$t + \Delta t$	b	中継	車 c
$t + 2\Delta t$	c	アップロード	セル B
$t + 2\Delta t$	-	deadline	-

表 2 ダウンロード時のオフローディング経路情報

時刻	車	イベント	中継先
$t + \Delta t$	d	中継	車 c
$t + \Delta t$	c	中継	車 b
$t + 2\Delta t$	b	中継	車 a
$t + 2\Delta t$	-	deadline	-

データに付加してソースルーティングを行えばよい。後者の場合に付加されるオフローディング経路の情報を表 1 に示す。

3.3.2 ダウンロード時の経路探索

ダウンロード時に、混雑しているセルにいる通信ノードが、混雑しないセル内の通信ノードから中継してもらってデータを空間的オフローディングできるかどうかは、データの遅延許容時間内での後者から前者のノードへの可達性判定で判定できる。

図 4 を元に、混んでいるセル A の通信ノード a がダウンロードデータを、空いているセル B から空間的オフローディングすることを考える。現在時刻を t とし、遅延許容時刻を $t + 2\Delta t$ とする。このとき、セル B に属するいずれかのノードから、時刻 $t + 2\Delta t$ のノード a へのパスが見つければ良い。例えば、 $a_{t+2\Delta t} \leftarrow b_{t+2\Delta t} \leftarrow b_{t+\Delta t} \leftarrow c_{t+\Delta t} \leftarrow d_{t+\Delta t} (\leftarrow d_t)$ で到達可能である。このとき、 a から要求を受けたセル A の MDOP サーバは、現在 d の属するセル B の MDOP サーバに要求を出し、 d にデータをダウンロードしてもらって上記のルートを付加してルーティングすればよい。このときに付加されるオフローディング経路の情報を表 2 に示す。

3.4 移動予定経路情報の更新

3.2 節では、移動予定経路情報を利用した空間的オフローディングの方法を示した。しかし、実際の移動予定経路情報は不正確なものと考えられる。移動予定経路情報が不正確であると、送受信期限までに予定していた隣接セルに行かない、予定していた車両と出会わずに中継ができないといったことが起こる。また、移動予定経路情報は時間が経つほどより不正確になると考えられる。そこで、通信ノードは移動予定経路情報を定期的に更新し、MDOP サーバにアップロードすることを考える。これにより、MDOP サーバは、各ノードについて常にある程度正確な移動予定経路情報を知ることができる。

このときの空間的オフローディングの流れを図 5 に示す。

まず、通信ノードが予定していた時刻に予定していた隣接セルに行かなかった場合、または予定していた時刻に予定していた車両にデータを中継できなかった場合を考える。アップロードデータの場合で、送信期限が近ければ、現在利用可能なセルを使用して直ちにアップロードする。ダウンロードデータの場合で、受信期限が近ければ、中継車両はデータを破棄し、要求車は受信期限の近くまでデータが届かなければ現在利用可能なセルを使用して直ちにデータをダウンロードする。送受信期限までに時間がある場合は、中継車は MDOP サーバに自身の最新の UE.Info（現在位置、接続中の基地局 ID、移動予定経路）を送信し、オフローディング経路の再計算を要求する。

要求を受けた MDOP サーバは、その時点における各ノードの最新の移動予定経路情報をもとにオフローディング経路の再計算を行い、その結果を UE に送り返す。再計算されたオフローディング経路情報を受け取ったノードは、データに付加されたオフローディング経路情報を受信したオフローディング経路情報に更新し、再びその経路にもとづいてオフローディングを試みる。ここで、再計算の結果、オフローディング経路がないと判断された場合、または再計算しても次の宛先と中継時刻が変わらない場合には、UE は空間的オフローディングをキャンセルする。

その後は、本来の MDOP の動作の通り、時間的オフローディングを試み、時間的オフローディングも不可能であると判断された場合は現在利用可能な基地局によって、現在の基地局の混雑にかかわらず即時に通信を行う。また、予定していた中継先の車両またはアップロード先のセルに予定していた時刻より早く接触した場合は、接触した時刻にデータを中継またはアップロードする。

ところで、オフローディング経路情報の最後に記載された中継先は、最終的な宛先である。すなわち、アップロードの場合は最終的にデータをアップロードする空いているセルであり、ダウンロードの場合は空いているセルからダウンロードしたデータを届ける宛先のノードである。そこで、オフローディング経路の途中のノードが、予期せずに最終的な宛先のセルまたは最終的な宛先のノードに接触した場合は、そのままデータをそのセルでアップロード、またはそのノードに中継する。

4. 評価

3章では、通信ノードの移動予定経路情報を用いて、モバイルトラフィックを空いているセルにオフローディングする枠組みを提案した。

本章では、通信ノードは車両であり、データをアップロードまたはダウンロードしたい車両（要求車）のいるセルが混雑しており、その他のセルが空いている状況を想定する。また、単純化のため時間的オフローディングは考慮せず、空間的オフローディングのみを評価の対象とする。

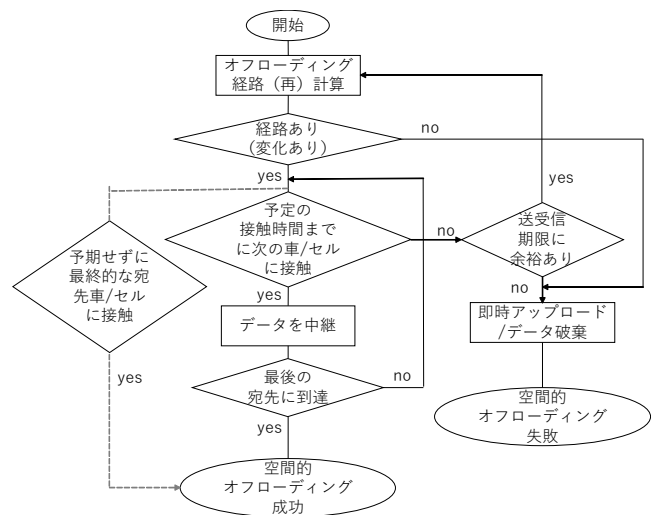


図 5 空間的オフローディングの動作の流れ

要求車が許容遅延時間内に空いているセルに移動することがわかっている場合、そのセルへの移動を待ち、移動後にモバイル通信をすることでオフローディングが可能である。また、要求車が許容遅延時間内に空いているセルに移動しない場合でも、アドホック通信によって要求車から空いているセルまで、または空いているセルから要求車までデータを中継する経路が存在すれば、その経路を使用することでアップロードデータまたはダウンロードデータのオフローディングが可能である。与えられた許容遅延時間内で、これらのオフローディング経路が存在するかどうかをシミュレーションにより求める。

4.1 調査項目

ここでは、車両間の無線通信の可否と移動予定経路情報の正確性について理想的な条件を設定し、移動予定経路情報を用いたオフローディング経路の存在率の上界を求める。

4.2 対象のエリアとセルの配置

評価の対象とするエリアは、日本で最もモバイルデータトラフィックが集中すると考えられる都市部（千代田区）の 5km 四方のエリアとする。このエリアの中央に、図 6 のように半径 1km のセルを等間隔に 3 つ配置する。ただし、2 つのセル範囲が重なっている部分については、より近い方のセルの範囲に属するものとする。なお、一般的な携帯電話の基地局のカバーする範囲は数百 m から数 km である [7]。

4.3 交通流データ

現実的な交通流を再現するため、政野ら [6] が生成した、前述のエリアにおける 1 秒ごとの車の位置データを用いる。これは、都道府県等によるアンケート調査であるパーソントリップ調査（PT 調査）の結果に基づいて東京大学空間

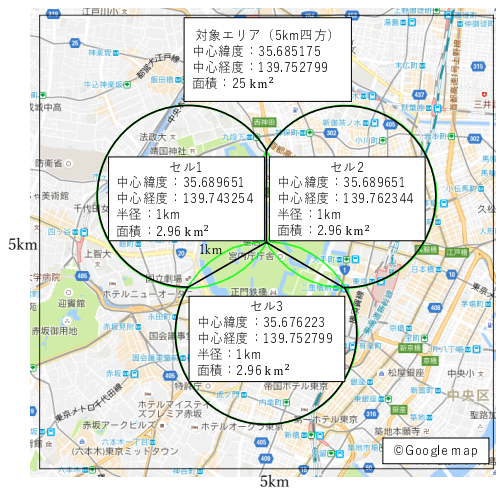


図 6 セル配置

表 3 交通流データ

台数	6377 台
平均の移動時間	12 分
平均の移動速度	18km/h

情報科学研究センターが生成した 1 分ごとの車の位置データを、政野らが交通流シミュレータ SUMO を用いて 1 秒ごとの位置データに変換したものであり、実交通流の 1/40 程度の車両密度であることが示されている。本稿では、前節で述べた対象エリア内の 24 時間分の交通流データを使用する。台数、1 台当たりの平均の移動時間、エリア内における平均の移動速度を表 3 に示す。

4.4 通信環境

無線通信の条件として、車両同士の距離が半径 r m 以内であれば通信は必ず成功するものとする。移動予定経路情報の条件として、あらかじめ車両の 1 秒ごとの位置が正確にわかっているものとする。上記の条件の下で、各車両が各秒についてアップロードまたはダウンロードを要求した場合のオフローディング経路の存在率を求める。このとき、要求車が要求した時刻にいるセルのみ混雑しており、その他の 2 セルおよびどのセルにも属さない領域（セル外）は空いているものとする（セル外を空いているセルと見なすのは、本来はその場所に隣接セルが存在すると考えるためである）。ただし、車両のいる位置がセル外である時刻については計算に入れない。また、車両の残りの移動時間が許容遅延時間よりも短くなる時刻についても計算に入れないものとした。

r として、一般的な WiFi の見通し環境での通信距離である 100m、より現実的と考えられる 40m、比較のための 200m の 3 つのケースのそれぞれについて、送受信データの許容遅延時間を 10 秒から 600 秒の間で 10 秒刻みに変化させたときのオフローディング経路の存在率を求めた。なお、経路の存在率の計算対象となる時間の延べ秒数は許容

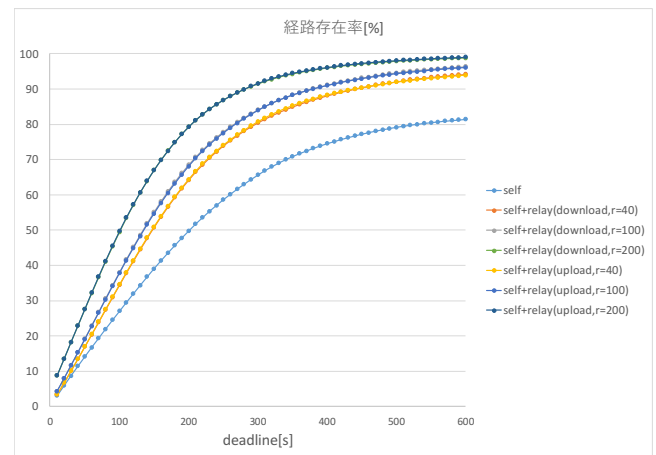


図 7 理想的な条件でのオフローディング経路の存在率

遅延時間が 10 秒の場合は約 170 万秒、600 秒の場合は約 63 万秒であった。また、要求車と要求時刻の組に対して、オフローディング経路は複数存在する場合があるが、ここでは最小ホップのオフローディング経路を求めた。

4.5 結果

得られたオフローディング経路の存在率を図 7 に示す。また、このとき得られた 1 ホップ以上の経路の数に対して、各ホップ数の経路の数が占める割合を図 8、図 9、図 10 に示す。

図 7 の self は、要求車自身が許容遅延時間内に移動するオフローディング経路の存在率を示しており、この経路のホップ数は 0 である。self+relay は、車両間の中継が発生するようなオフローディング経路も含めた存在率を示している。存在率のグラフから、要求車自身が空いているセルに移動しなくても、データ中継によりオフローディングできる場合があり、許容遅延時間が長くなるほど、また無線通信の半径 r が大きいほど可能性が高くなることがわかる。また、データ中継を含めたオフローディング経路の存在率は、 r が 40m の場合でも許容遅延時間が 5 分以上あれば 8 割を超えている。

4.6 考察

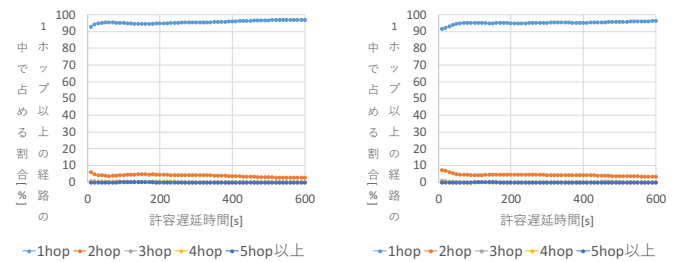
ホップ数の割合のグラフから、データ中継を含むオフローディング経路の中では、1 ホップの経路がほとんどを占めることがわかる。車両間のデータ中継は、移動予定経路情報が不正確なために想定していた車両に出会わないことや、出会っても接触時間が短く中継に失敗するといったことが考えられるため、1 ホップの経路が多いという結果は移動予定経路情報とデータ中継を用いるオフローディングにとって好ましいといえる。また、許容遅延時間が短い場合に 2 ホップ以上の経路の占める割合が比較的大きくなる傾向がみられる。これは、長期的には 1 ホップでも中継車両が空いているセルへ移動できる、あるいは空いている

セルから移動してきた車両からデータを受け取れる場合が多いのに対し、時間が短いと1ホップだけでは空いているセルと要求車の間の距離を埋められないことが多くなるからだと考えられる。ところで、移動予定経路情報は、現在時刻に近い位置情報ほど正確であり、現在時刻から遠い位置情報になるほど不正確になると考えられる。許容遅延時間が短い場合のオフローディング経路では、中継の時間も早くなるため、この点で有利である。また、無線の通信距離 r が大きいほど2ホップ以上の割合が大きくなっている。 r が大きい場合、 r が小さいときに利用可能な経路はすべて利用可能であるため、1ホップの経路の数が減ることはない。一方、 r が小さいときにオフローディング経路が存在しない場合でも、 r が大きければ経路が見つかる場合がある。 r が大きい場合でも、車両の移動性は変わらないが、中継先を選べる車両が増えるため、複数の中継によって空いているセルと要求車の間をつなぐような経路の割合が大きくなっていると考えられる。なお、使用した交通流データは実際の交通流の1/40程度の車両密度であるため[6]、以上の結果は全車両のうち2.5%が協力してデータ中継を行った場合の結果と考えることができる。実際には移動予定経路情報のずれや建物による電波の遮蔽、帯域幅と車両同士の接触時間に対して中継するデータサイズが大きいことなどにより有効な経路は限られることになるが、移動予定経路情報を使ったオフローディングの持つ可能性は大きいと考える。

5. まとめ

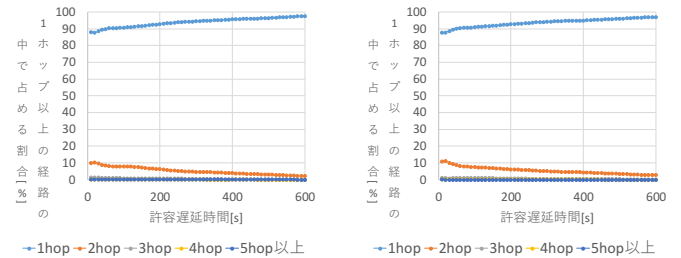
通信ノードがオフローディング制御のためのサーバに定期的に移動予定経路情報をアップロードし、サーバで許容時間内に通信ノードと空いているセルの間に経路が存在するかを判定し、結果に応じて通信ノードに適切な指示を送ることにより、アップロードとダウンロードの両方についてモバイルデータを空間的にオフローディングする手法を提案した。また、無線通信と移動予定経路情報に関して理想的な条件を設定し、無線の通信距離 r が40m, 100m, 200mの場合について、許容遅延時間を10秒から600秒の間で10秒ごとに変化させたときのオフローディング経路の存在率と、最小ホップのオフローディング経路のホップ数を調査した。結果、許容遅延時間が5分以上の場合には80%以上の確率でオフローディング経路が存在し、見つかった1ホップ以上の経路のうち、1ホップの経路が大半であった。このことから、移動予定経路情報を利用したオフローディングは高い可能性を持っていると考える。

今後の課題として、帯域幅や通信ノードの接触時間など現実的な無線通信の条件を考慮した評価が挙げられる。また、移動予定経路情報が正確でなく、定期的に更新されるシナリオにおける評価が必要である。



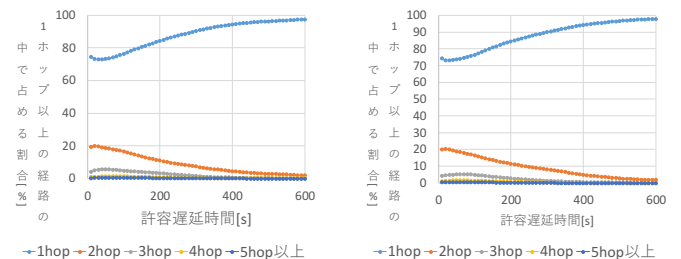
(a) アップロード経路のホップ数 (b) ダウンロード経路のホップ数

図8 $r=40m$ のときのオフローディング経路のホップ数



(a) アップロード経路のホップ数 (b) ダウンロード経路のホップ数

図9 $r=100m$ のときのオフローディング経路のホップ数



(a) アップロード経路のホップ数 (b) ダウンロード経路のホップ数

図10 $r=200m$ のときのオフローディング経路のホップ数

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 26280028 (基盤研究 (B)「モバイルデータ 3D オフローディングの研究」) の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] 総務省, “分野別データ:通信:トラヒック”, <http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/field/tsuushin06.html>. (2016-08-11)
- [2] 西岡哲朗, 木谷友哉, 太田剛, 峰野博史, “モバイルデータオフローディングプロトコル (MDOP) の提案”. 情報処理学会マルチメディア、分散協調とモバイルシンポジウム 2014 論文集, Vol. 2014, pp. 613–620, Jul 2014.
- [3] F. Mehmeti and T. Spyropoulos, “Is it worth to be patient? analysis and optimization of delayed mobile data offloading”, In *IEEE INFOCOM 2014 - IEEE Conference on Computer Communications*, pp. 2364–2372, April 2014.
- [4] Zongqing Lu, Xiao Sun, and Thomas F. La Porta, “Cooperative data offloading in opportunistic mobile networks”, *CoRR*, Vol. abs/1606.03493, 2016.
- [5] Ning Wang and Jie Wu, “Opportunistic wifi offloading in a vehicular environment: Waiting or downloading now?”, In *Proc. of the 35th IEEE International Conference on Computer Communications (IEEE INFOCOM 2016)*,

2016.

- [6] 政野博紀, 木谷友哉, 峰野博史, “VANET によるモバイルデータオフローディング遅延時間について東京都市圏の実情報を用いた評価”, 情報処理学会第 78 回全国大会講演論文集, Vol. 2016, pp. 347–348, Mar 2016.
- [7] 岸山祥久, 内野徹, 永田聡, 森本彰人, Yun Xiang, “LTE/LTE-Advanced 高度化におけるヘテロジニアスネットワーク容量拡大技術”, NTT DOCOMO テクニカル・ジャーナル, Vol. 21, No. 2, 2013.