

輸送機関網へのデータオフローディングにおける 遅延許容可能データのためのデータ配送スケジューリング

檜原 茂¹ 高井 峰生^{2,3} 金田 茂⁴

概要: 本論文では、これまでに提案した輸送機関網を用いたデータオフローディング [1] において、遅延を許容可能な大容量データを要求された遅延時間内に配送するためのデータ配送スケジューリングを提案し評価する。輸送機関網へデータオフローディングするためのデータの蓄積・転送を行うデータポートにおいて、First-Come, First-Serve (FCFS) によりデータ配送を行った場合、ユーザの許容可能な遅延時間内に配送が完了できないデータが発生し、データオフローディングが十分に機能しない。そこで、輸送機関網へのデータオフローディングの通信性能を改善するために、本論文では、アップロードの通信フローを対象とし、許容可能遅延時間内にデータ配送を完了するためのデータ配送スケジューリングを提案する。シミュレーション実験より、データポートにデータ配送スケジューリングを導入することで、バスシステムを対象とした輸送機関網において、バスが運搬したすべてのデータが許容可能遅延時間内に配送が完了することを示した。

Delay-Tolerant Data Object Delivery Scheduling For Data Offloading Over Public Transportation Systems

SHIGERU KASHIHARA¹ MINEO TAKAI^{2,3} SHIGERU KANEDA⁴

1. はじめに

Android 端末や iPhone 等の高機能なスマートフォンの急速な普及に伴い、モバイルデータのトラフィック量が急増している。シスコシステムズによるモバイルデータトラフィックに関する調査報告書 [2] では、2012 年から 2017 年の 5 年間に全世界のモバイルデータトラフィックが 13 倍増になると予測している。このように急増するモバイルトラフィックがモバイルネットワークの通信帯域を圧迫し、ユーザが求める通信品質を提供することが困難になりつつある。

モバイルデータトラフィック量の増加がユーザへの通信品質に与える影響を軽減するために、各通信キャリアとも Long Term Evolution (LTE) 等の通信インフラの拡充を進めているが、通信インフラの拡充だけではユーザが要求する多様な通信品質を満たすことは難しい。一方で、段階的あるいは従量制データプランへの移行、通信量の多いユーザに対する通信規制の導入も行われている。しかし、このようなデータプラン変更や通信規制は、ユーザの利便性を大きく損なうことになると考えられる。

問題の根源は限られた無線資源にあるため、既存の通信インフラの拡充だけでは不十分である。そこで、他の無線資源も有効活用するため、モバイルトラフィックを WiFi を用いて固定ネットワークへデータオフローディングすることが行われている。しかし、基本的にアクセスポイント (AP) は喫茶店や駅などの屋内での通信を対象としており、また、一つの AP 自体が提供可能な通信範囲も狭い。屋内での WiFi の通信速度は LTE や 3G 等のモバイルネットワークより速いが、AP に接続するユーザ数が増加した場

¹ 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科
〒630-0192 奈良県生駒市高山町 8916-5

² Dept. of Computer Science, University of California, Los Angeles (UCLA)
420 Westwood Plaza, Los Angeles, CA 90095, USA

³ 大阪大学 大学院情報学研究所

〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1

⁴ Space-Time Engineering, LLC.
777 Silver Spur Road, Suite 227, Rolling Hills Estates, CA 90274, USA

合、通信速度はモバイルネットワークよりも低下する可能性がある。一方、移動中の使用においては、得られる通信速度はモバイルネットワークよりも遅いという結果が報告されている [3][4]。

WiFi を用いたデータオフローディングの効果を向上させるために、アプリケーションやユーザが許容可能な遅延時間を考慮したデータオフローディング手法も研究されている [5][6]。ユーザはモバイルネットワークへ接続しているときは、得られる通信速度に関係なくいつでも通信を開始することができるが、アプリケーションによっては遅延を許容可能なデータもある。例えば、リアルタイム性を必要としない(遅延を許容可能な)データ(例えば、メール、マルチメディアデータ、ソフトウェアアップデート、バックアップデータ等)は、WiFi エリアに入るまで通信開始を遅らすことで、データオフローディングの効率を向上させることができる。実際、既存のモバイルネットワークにおいて得られる通信速度は限られているため、WiFi エリアを探してから通信を開始する方が、短時間で通信を完了できる可能性が高い。また、通信時間の削減はバッテリー消費の削減にもつながる。しかし、マルチメディアデータやバックアップデータ等の大容量データに関しては、遅延を許容して WiFi を用いてデータオフローディングしても十分に対応できない。例えば、既存のモバイルネットワークの平均速度を約 2 Mb/s^* と仮定した場合、約 10 分のビデオファイル (2 GB^{**}) をダウンロードするために 2 時間以上を要してしまう。また、アップロードに関してはさらに時間がかかる。一方、WiFi はモバイルネットワークよりも通信速度が速いとされているが、混雑度や電波の受信状況等により常に安定した通信速度を得ることは難しい。そのため、通信完了時間を正確に予測することは難しく、またデータ通信中は通信エリア内に滞在する必要があるため、ユーザの移動に制約が生じる。

遅延を許容可能な大容量データを送受信するための方法として、筆者らはこれまで文献 [1] において高速近接無線通信と送受信ネットワークを用い、Delay Tolerant Network (DTN) [7] の概念を取り入れた新たなモバイルデータオフローディング手法を提案した。提案手法では、主に遅延を許容可能な大容量データを対象とし、ユーザの移動制約を可能な限り取り除くために、バス、電車等の運行スケジュールに従って稼働している送受信ネットワークへデータオフローディングを行う。つまり、送受信ネットワークをユーザとインターネット間の通信媒体として用いる。具体的には、ユーザがデータ送信を行う際には、ユーザは高速近接無線通信を用いて駅などに設置されているデータポートへモバイルデータを転送する。そして、データポートはユーザから転送されたモバイル

データを送受信ネットワークへ転送し、送受信ネットワークはそのデータをターミナルまで運搬する。ターミナル到着後、送受信ネットワークは運搬したデータをインターネットへ転送する。一方、ユーザがデータを受信する際には、送受信ネットワークはインターネットからユーザ宛のデータを受信し、ユーザが指定するデータポートへデータを届ける。そして、ユーザはデータポートへ向かい、高速近接無線通信を用いて大容量データを短時間で受信する。送受信ネットワークはユーザの日常生活に密着(例えば、通勤、通学で利用)しており、特に都市部においては頻繁にアクセスする機会を得ることができるため、ユーザがアクセス可能な場所、及びアクセスが可能になる時間(ユーザが送受信ネットワークへ到達する時間)に対する予測がしやすい。また、送受信ネットワークは基本的に運行スケジュールに従って稼働しているため、データの配送時間においても予測が可能となる。文献 [1] では、送受信ネットワークを用いたデータオフローディングの基本設計と基本性能を示し、本データオフローディング手法を実現するために必要な技術課題について考察した。

本データオフローディング手法は Store-Carry-Forward 方式でモバイルデータを配送するため、データの送受信に遅延が発生する。しかし、データはいつか届けばいいというものではなく、データが許容可能な遅延時間内に配送する必要がある。つまり、許容可能遅延時間を超えた場合、ユーザにとってそのデータの価値はなくなっているかもしれない。そのため、ユーザが許容可能な遅延時間内にデータ配送を完了するための仕組みが重要となる。そこで、本研究では、最初のステップとして、ユーザからのアップロードの通信フローに着目し、許容可能遅延時間内にデータ配送を完了するためのデータ配送スケジューリングを提案する。また、シミュレーション実験を行い、提案したデータ配送スケジューリングにより、許容可能遅延時間内に配送されるデータ量について評価を行う。

2. 関連研究

本節では、モバイルデータオフローディングに関する研究について紹介する。文献 [3][4] では、WiFi を用いたデータオフローディングの効果について、実測に基づいた結果が示されている。文献 [3] は、多くの学生が移動する Carnegie Mellon University と商業地の間において、徒歩と自動車を用いて移動中の 3G ネットワークと WiFi の通信速度を計測している。計測結果から、徒歩および自動車での移動中におけるダウンロードに対する平均通信速度は、3G ネットワークの方が通信速度が速く、瞬間的な最大通信速度に関しては、WiFi の方が速いと報告している。一方、アップロードに関しては、3G ネットワークの通信速度は基本的に遅いため、WiFi が平均および最大通信速度とも良好であることが分かった。文献 [4] では、Amherst、Seattle、San Francisco の 3 都市において、自動車での移

*1 2012 年の全世界でのスマートフォンの平均速度 [2]。

*2 Qucik Time Motion Jpeg 形式 (1270*720, 30fps) の動画を仮定。

動中における 3G ネットワークと WiFi の通信速度について調査している。調査結果より、ダウンロード及びアップロードの両方において、3G ネットワークが WiFi よりも通信品質が良好であるという結果が得られている。したがって、移動時は 3G ネットワーク、静止時に WiFi を用いることで、ユーザにとって良好な通信品質が得られ、データオフローディングの効果が向上する。

更に効果的なデータオフローディングを行うために、遅延を許容可能なデータを対象としたデータオフローディングに関する研究が行われている [4][5]。文献 [4] では、データに許容可能な遅延時間の閾値を設定し、移動中に接続できる WiFi の予測通信速度とデータサイズを考慮することで、可能な限り WiFi を用いて許容可能な遅延時間内にデータの送受信を行うためのデータオフローディング手法が提案されている。WiFi だけで許容可能な遅延時間内にデータの送受信ができない場合は、3G ネットワークも使用し、許容可能な遅延時間内のデータ配送を目指す。一方、文献 [5] では、Seoul において、97 人の被験者の iPhone の WiFi への接続状況を調査し、その調査結果から、遅延を許容可能なデータを WiFi へデータオフローディングした際の効果を評価している。この結果より、遅延を許容しないとき場合のデータオフローディングの効果 (64.7 %) に比べて、6 時間の遅延時間を許容した場合、データオフローディングに対する効果は 87.5 % まで向上することが分かった。しかし、これらの結果について、Lee らは、データオフローディングの効果は WiFi の通信可能エリアとユーザモビリティに強く依存すると述べている。一方、WiFi 以外のデータオフローディング手法としては、ユーザのデバイス間において Store-Carry-Forward 方式でモバイルデータをオフローディングする方法も提案されている [6]。このように、アプリケーションやユーザが許容可能な遅延時間を考慮したデータオフローディングも提案されている。

一方で、モバイルデバイスのバッテリー消費を考慮したデータオフローディングも提案されている。文献 [8] ではスマートフォン (Nokia N900) を用いて、AP のスキューニングがバッテリーに与える影響を調査し、AP のスキューニング間隔を考慮したモバイルデータオフローディングの必要性について述べている。文献 [9] においても、スマートフォン (Nokia N-95 と Android G1) を用いて同様に AP のスキューニングがバッテリーに与える影響を調査している。これらの結果から、AP のスキューニング間隔を長くすればバッテリーの消費を抑えることができるが、一方で次の WiFi の接続先を見つけるタイミングが遅くなる。その結果、移動中の WiFi への接続時間が短くなってしまふ。したがって、WiFi へ効率よく接続し、データオフローディングするためには、AP のスキューニング間隔とバッテリー消費を考慮する必要がある。また、WiFi への効率的な接続を行うために、ユーザの日々の予測可能な移動に着目し、WiFi の接続先

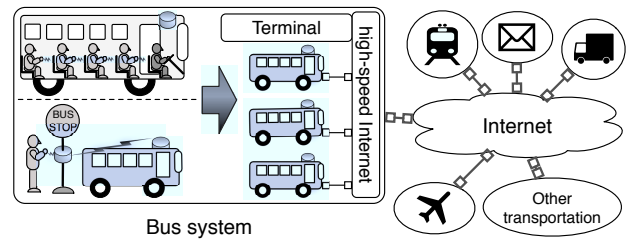


図 1 データオフローディングに使用する輸送機関網

を予測する手法も提案されている [10]。このように WiFi を用いたデータオフローディングに対して様々な提案が行われているが、データオフローディングの効果を向上させるためには、基本的にはユーザが接続可能な AP の増設が必要不可欠である。しかし、その一方で、AP の配置や干渉問題による通信品質の劣化も発生するため、ユーザが期待する通信速度を常時提供するためには解くべき課題が多く残されている。

3. 輸送機関網を用いたデータオフローディングとその効果

本節では、文献 [1] において提案した輸送機関を用いたデータオフローディング手法とその基本性能について述べる。3.1 節では、本データオフローディング手法を概説し、3.2 節において、その基本性能を示す。3.3 節では、First-Come, First-Serve (FCFS) でデータ配送を行った際に、許容可能遅延時間内に配送が完了したデータ量を評価する。

3.1 輸送機関網へのデータオフローディング

本論文で対象としている輸送機関とは、図 1 に示すように、バス、電車、郵便、配送トラック、飛行機等のスケジュールに従って運行している輸送機関を指す。つまり、ユーザはこれらの輸送機関にデータをオフローディングする。なお、前提条件として、モバイルデバイスは TransferJet [11] や WiGig [12] 等の高速近接無線通信インタフェイスを搭載していると仮定する*3。これらの無線通信インタフェイスは近距離での超高速無線通信をターゲットとしており、今後、スマートフォンのようなモバイルデバイスへの搭載が計画されている。

本論文では例としてバスシステムを対象としたデータオフローディング方法について説明する。図 2 では、アップロードとダウンロードの通信フローを示している。アップロードの通信フローにおいては、ユーザはいつも利用しているバス停や通りかかったバス停、または通学・通勤中のバスの車内においてデータオフローディングを行うことができる。バス停においては、ユーザはデータに許容可能

*3 TransferJet は 560 Mb/s の通信速度の実現を目指しており、一方、WiGig は 7 Gb/s の通信速度の実現を目指している。

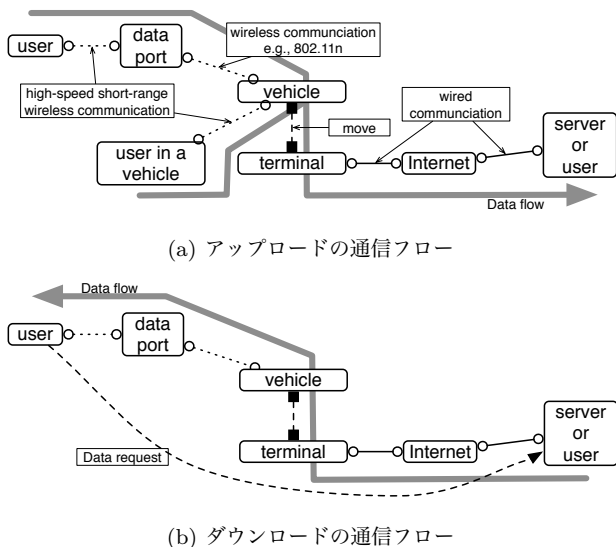


図 2 オフローディングにおける通信フロー

な遅延時間を予め設定した後、バス停に設置されたデータポートに対してデータ転送を行う。そして、データポートに転送されたデータは、バスが到着した際に、データポートとバス間で IEEE 802.11n や WiGig 等の無線通信を用いてバスのストレージに転送される。一方、バスの車内においては、ユーザは座席に設置された端末を使用して、バス内のストレージに直接データを転送する。そして、バスはストレージ内のデータをターミナルまで運搬した後、インターネットへそれらのデータを転送する。

一方、ダウンロードの通信フローにおいては、ユーザは自分が立ち寄るバス停にデータが配送されるようにサーバ等にリクエストを送信する。ターミナルにおいて、バスはユーザが要求したデータをインターネットから受信し、ユーザが指定するバス停のデータポートへ指定時間内にデータを配送する。そして、ユーザはモバイルデバイスを用いて短時間でデータポートからデータを受信する。このように、ユーザの日常生活の中にデータポートを配置することで、ユーザの移動に対する制約が緩和され、また、高速近接無線通信により短時間で大容量データをオフローディングすることが可能となる。

3.2 バスシステム上での基本性能

本節では、バスシステムを例とし、1つのバス停でのデータオフローディングの基本性能について述べる。また、問題を簡略化するため、以下の仮定の下で通信性能を求める。通信フローはアップロードを対象とし、データポートとバス間のデータ通信は、バスがバス停に停車している間のみ行われ、また、データポートには送信のためのデータが十分に蓄積されていると仮定する。このとき、運行時間中にバスシステムが扱えるデータオフローディング量は、データポートとバス間の通信速度、バス停での停車時間、バスの

本数、運行時間から求められる。データポートとバス間の通信メディアを IEEE 802.11n (実行速度: 222 Mb/s [13]) とし、運行時間は 6 時から 24 時までの 18 時間と仮定した場合、一日の運行時間中のデータオフローディング量は、データオフローディング量 (MB) = (データポート・バス間の通信速度 (Mb/s) × バスの停車時間 (s) × バスの本数) / 8、となり、運行時間中のデータオフローディングのスループットは、スループット (Mb/s) = (データオフローディング量 (MB) × 8) / バスの運行時間 (s) により求められる。

図 3(a) は、あるバス停における 1 日の運行時間中のデータオフローディング量を示す。例えば、一日のバスの本数を 54 本 (20 分毎運行)、バス停での平均停車時間を 120 秒とした場合、1 つのバス停で約 180 GB のデータをバスシステムへオフローディングすることができる。一方、図 3(b) は、図 3(a) をもとにデータオフローディング量を運行時間中の実効スループットに換算した結果であり、上記の例では実効スループットは 22.2 Mb/s となる。この結果は 1 つのバス停での実行スループットを示しているため、例えば、10 のバス停がバスシステムにデータオフローディングした場合、そのバスシステムの実行スループットは 10 倍の 222 Mb/s となる。また、本データオフローディングは、エンドツーエンドでの通信を必要せず、ユーザはデータポートとのみ直接データ通信を行うため、混雑や電波状況等による通信速度の低下が起こりにくく、大容量データを短時間でオフローディングをすることができる。

3.3 許容可能遅延時間を考慮した際の通信性能

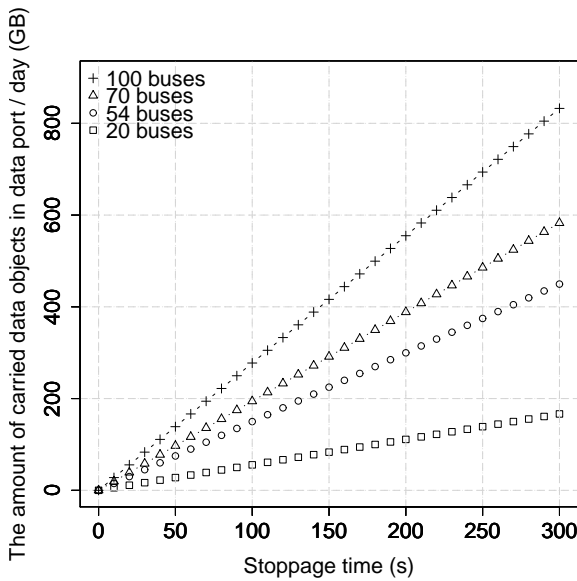
3.2 節では、許容可能遅延時間を考慮せずに理想環境での基本性能を示した。本節では、前節の条件の下で、許容可能遅延時間を考慮した際のアップロードの通信フローに対する通信性能をシミュレーションにより評価する。本研究では特に、ユーザと輸送機関をつなぐ役割を果たし、かつ、許容可能遅延時間内にデータ配送を行う上で最も重要となるデータポートでの通信性能を評価する。

表 1 にシミュレーションで用いるパラメータを示す。ユーザはポアソン分布に従いデータポートに到着し、平均到着時間間隔が 20 秒から 1,200 秒までの結果を調査する。ユーザが送信するデータのデータサイズは 1 MB から 2,000 MB の一様分布に従い、また、許容可能遅延時間も 3,600 秒から 7,200 秒または 14,400 秒の一様分布に従う。このとき、データサイズが 22.5 MB 以下の場合*4、ユーザは既存のモバイルネットワーク経由でデータ送信を行い、一方、22.5 MB よりも大きい場合、バスシステムへデータオフローディングを行うと仮定する。また、ユーザがデータポートに到着した時、他のユーザがデータポートを使用中の場合

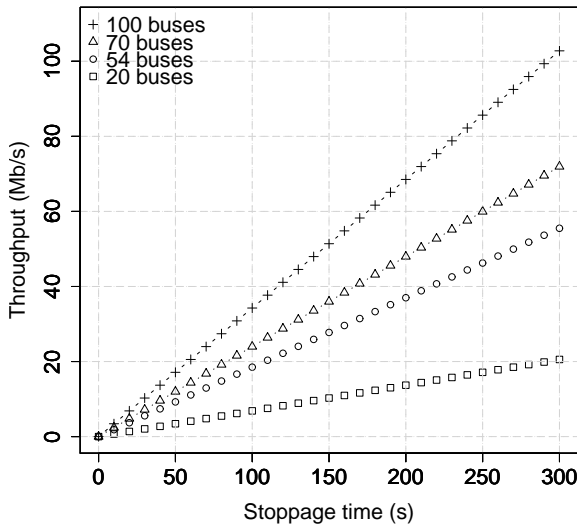
*4 アップリンク速度を 300 kb/s した場合、ユーザは 10 分間のデータ送信は許容できると仮定する。

表 1 シミュレーション諸元

User arrival rate (Poisson distribution)	From 20 to 1,200 sec
Data size (Uniform distribution)	Min: 1 MB Max: 2,000 MB
User desired delay (Uniform distribution)	Min: 3,600 sec Max: 7,200 and 14,400 sec
Throughput from a user to a data-port via Transfer Jet	375 Mb/s
Throughput from a data-port to a bus via IEEE 802.11n	222 Mb/s
Operation time	18 hours
Bus arrival interval	1,200 sec
The number of buses per day	54 buses
Stoppage time	120 sec



(a) データオフローディング量



(b) 運行時間中の実行スループット

図 3 1つのバス停におけるデータオフローディングの基本性能

は、新たに到着したユーザはデータ転送を行わずに立ち去る。一方で、到着時にデータポートが使用可能であれば、ユーザは TransferJet を用いてデータ転送を行う。

次にバスシステムに関するパラメタについて説明する。バスシステムの運行時間は 6:00am から 12:00am の 18 時間とし、20 分間隔でバスが到着すると仮定する。つまり、1 日のバスの本数は 54 本となる。バス停では、バスは 2 分間の停車時間中に IEEE 802.11n を用いてデータポートからデータを受信する。このとき、バスが受信するデータは、許容可能遅延時間を考慮することなく、データポートから FCFS でバスに転送される。また、バスはバス停を出発すると、50 分後にターミナルに到着し、10 分以内にインターネット経由で運搬してきた全てのデータを転送する

と仮定する。

図 4 は、データポートにおける 1 台のバスに対する理想的なデータ転送量 (Ideal data)、実際に運搬されたデータ量 (Carried data)、及び許容可能遅延時間内に配送が完了したデータ量 (Successful data) を示す。なお、これまでの仮定の下では、バス 1 台当たりには 3,330 MB を運搬可能である。しかしながら、実際に運搬されたデータ量において、データポートがデータ転送のためのデータを十分に蓄積していたとしても、バスシステムはその運搬可能容量を十分に利用できていない。このような現象がおこる一つの理由としては、本シミュレーションではデータが分割されて運搬されることは仮定していないため、あるデータがバスの出発時間までに転送が完了しない場合、そのバスへデータ転送することは行わず、次のバスの到着時に転送を行う。そのため、データポートのキューの後続にバスの出発時間までに転送可能なデータがあったとしても、FCFS の head-of-line blocking によりデータ転送が行われない。また、FCFS ではユーザの許容可能遅延時間内のデータ配送を保証することもできない。例えば、ユーザの平均到着時間間隔が大きくなると転送するデータ量も減少するため、許容可能遅延時間内に配送可能なデータ量は増加するが、各データが保持する許容可能遅延時間はランダムであるため、キュー内のデータの転送順番によっては許容可能遅延時間を保証することはできない。従って、輸送機関網を用いたデータオフローディングにおいて、許容可能遅延時間内にデータ配送を完了するためには、データポートにおいてデータ配送スケジューリングが必要となる。

4. データ配送スケジューリング

本節ではデータポートからバスへデータ転送を行うための 2 つのデータ配送スケジューリングを提案する。データ配送スケジューリングを提案することで、ユーザの許容可能遅延時間内に配送が完了するデータ量を増加させる。4.1

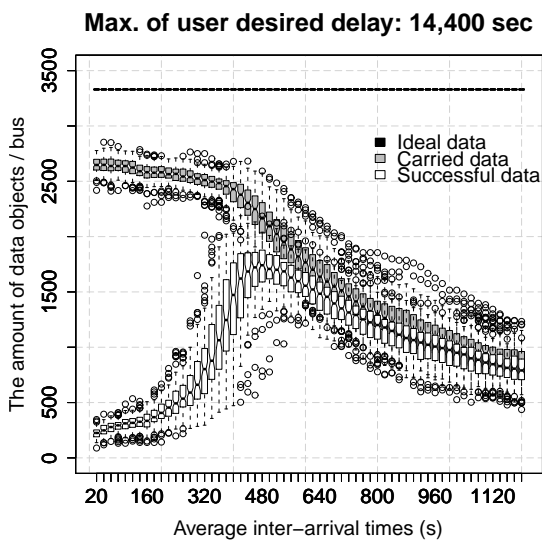
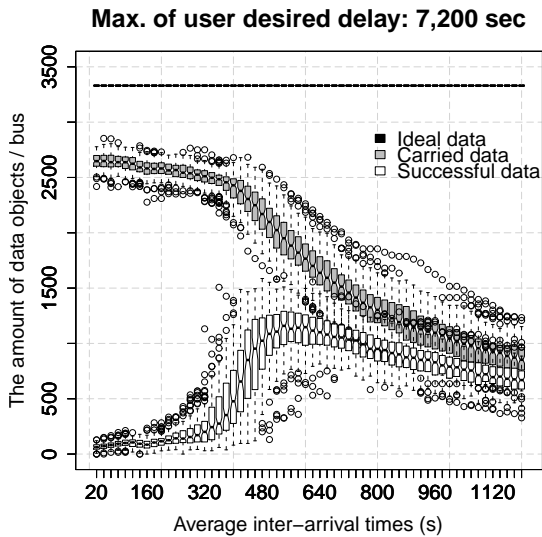


図4 ユーザの平均到着時間間隔に対する理想的なデータ運搬量、運搬されたデータ量、許容可能遅延時間内に配送が完了したデータ量

節では、データポートに必要な機能について述べ、4.2節と4.3節において、2つのデータ配送スケジューリングを提案する。

4.1 データポートに必要な機能

許容可能遅延時間内にデータ配送を完了するためには、データポートは遅延時間内に配送できないデータを受け付けてはいけな。そこで、図5に示すように、ユーザがデータをデータポートに転送する前に、データポートが転送予定のデータのデータサイズと許容可能遅延時間を取得し、許容可能遅延時間内にデータ配送を完了できるかどうかを示す必要がある。また、バスの運搬能力を向上させるために、データサイズと許容可能遅延時間に基づいたデータ配送スケジューリングが必要となる。

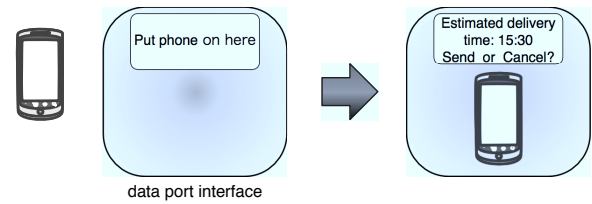


図5 データポートの使用例

4.2 Forward-packing delivery scheduling algorithm (FPA)

1つ目のデータ配送スケジューリングとして、Forward-packing delivery scheduling algorithm (FPA) を提案する。図6に示すように、FPAは各バスに対して停車時間内に送信可能なデータ量 (transmittable data amount within stoppage time) とインターネットへデータを配送するまでにかかる時間 (arrival time to the Internet) を管理し、各バスに対するデータ配送を決定する。FPAの動作について説明する。図5に示すように、ユーザがスマートフォンをデータポートのインタフェース上に置くと、データポートはユーザが送信しようとしているデータのデータサイズと許容可能遅延時間を取得する。次に、データポートはバス停にバスが停車しているかどうかを確認する。バスが停車している場合は、(1) バスがデータ運搬した際にインターネットへ転送可能な時刻とデータの許容可能遅延時間を比較する。そして、インターネットへの転送時間がデータの許容可能遅延時間より小さい場合、(2) 停車時間内にバスへのデータ転送が完了するかを評価する。データ転送が可能であれば、データポートはユーザからのデータ受信を開始し、同時にバスへのデータ転送も開始する。もし、(1) または (2) の条件を満たさない場合は、(1) と (2) を満たす後続のバスを順番に調べる。条件を満たすバスが存在する場合、データポートはユーザからデータを受信し、条件を満たしたバスが停車した際にそのデータを転送する。なお、データの許容可能な遅延時間内に配送可能なバスが利用できない場合は、データポートはユーザからのデータを受信しない。したがって、FPAではバスの到着順にデータの許容可能遅延時間とバスへの転送時間をもとに、データ配送のスケジューリングを行う。

4.3 Backward-packing delivery scheduling algorithm (BPA)

次に Backward-packing delivery scheduling algorithm (BPA) について述べる。BPAではFPAと同様に、データサイズとデータの許容可能遅延時間をもとに配送スケジューリングを行うが、FPAのようにバスの到着順に配送スケジュールを行うのではなく、許容可能遅延時間内に送信可能なバスの中で最も後続のバスから前方のバスへスケジューリングを行う。BPAの動作を図7に示す。BPA

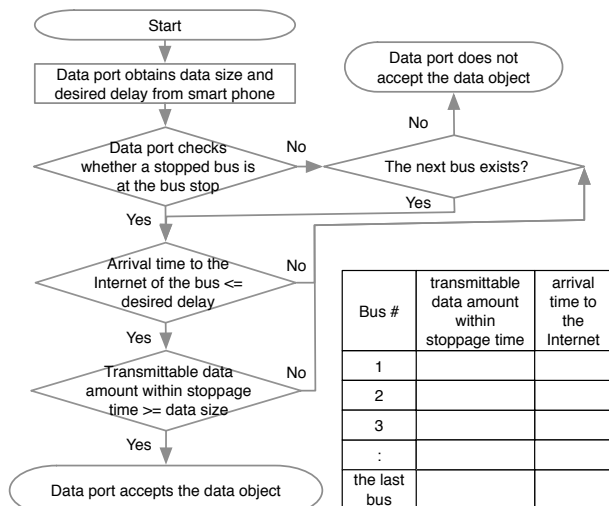


図 6 Forward-packing delivery scheduling algorithm

では、データポートはスマートフォンからデータサイズと許容可能遅延時間を取得すると、許容可能遅延時間内にデータ配送が可能な最も後続のバスを調べる。もし、条件を満たすバスがない場合、データポートはスマートフォンからのデータを受信しない。一方で、条件を満たすバスがある場合は、データはポートはそのバスへデータを転送するために十分な時間があるかを調べる。十分な時間があれば、データポートはそのデータを受け入れ、そうでなければ、データポートはその1つ前のバスを調べる。この動作を繰り返し、条件が合えば、データポートはデータを受信し、該当のバスが到着した際にデータ転送を開始する。また、許容可能遅延時間内に配送可能なバスが存在しても、データ転送を完了するための十分な時間がなければ、データポートはスマートフォンからのデータを受信しない。このように、BPAの特徴としては、FPAと違い、後続のバスからデータ配送を割り当てるため、許容可能遅延時間が短いデータを受信した時に受け入れられる可能性を持つ。

5. シミュレーション評価

本節では前節で述べた2つのデータ配送スケジューリングの通信性能を示すために、FCFS、FPA、BPAをシミュレーション実験により評価する。本シミュレーション評価では、特に許容可能遅延時間内に配送が完了したデータ量に着目する。なお、シミュレーションモデルにおいては、3.3節と同様とし、要求遅延時間の最大値を7,200秒に設定した環境で評価を行う。

図8と図9に、FPAとBPAにおけるデータポートから各バスへ運搬されたデータ量(Carried data objects)と運搬されたデータの中で許容可能遅延時間内に配送が完了したデータ量(Successful data objects)を示す。これらのグラフから、FPAとBPAの両方において、バスが運搬したデータはすべて許容遅延時間内に配送されていることが

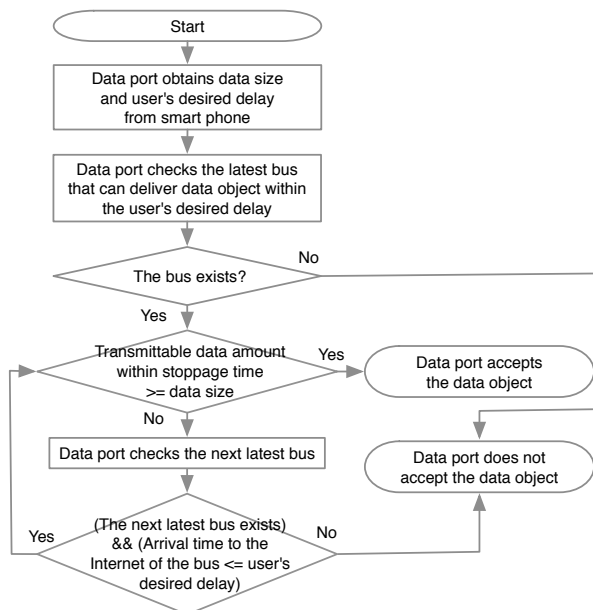


図 7 Backward-packing delivery scheduling algorithm

分かる。しかしながら、FCFSの結果(図4 Max. of user desired delay: 7,200 sec)と比較すると、FPAとBPAはデータのデータサイズと許容可能遅延時間を考慮してデータを受け入れを決定するため、ユーザの平均到着時間間隔が長くなるにつれてFCFSよりも運搬されたデータ量が減少している。

図10はFCFS、FPA、BPAにおける全生成データ量に対する許容可能遅延時間内に配送が完了したデータ量の割合(Satisfaction data ratio)を示している。ここでの全生成データ量とは、データポートにデータを転送したかどうかに関わらず、シミュレーション時間内に全ユーザが生成したデータ量のことを指す。つまり、データポートが使用できずに去ったユーザのデータ量も含んでいる。図10ではFCFSを基準として、FCFSとFPA、FCFSとBPAの結果をそれぞれ示している。FCFSとの比較により、FPAとBPAの両方において、ユーザの平均到着時間間隔が20秒から約500秒の間でSatisfaction data ratioが大幅に改善されていることが分かる。一方、ユーザの平均到着時間間隔が大きい場合、FCFS、FPA、BPAの3つにおいてほとんど同じ結果となり、バスの運搬可能なデータ量を使い切れていないことが分かる。原因としては、本シミュレーション実験では、バスへの転送時におけるデータのフラグメント化は考慮しないと仮定していたためと、ユーザがデータポートに到着した際に他のユーザが使用している場合はデータ転送を諦めるためである。また、FPAとBPAを比較すると、FPAのSatisfaction data ratioがBPAよりもわずかに良い結果を示している。これはBPAがデータを許容可能遅延時間内に配送可能なバスの中で最も後続のバスからデータ配送を決定するため、その結果、たとえ

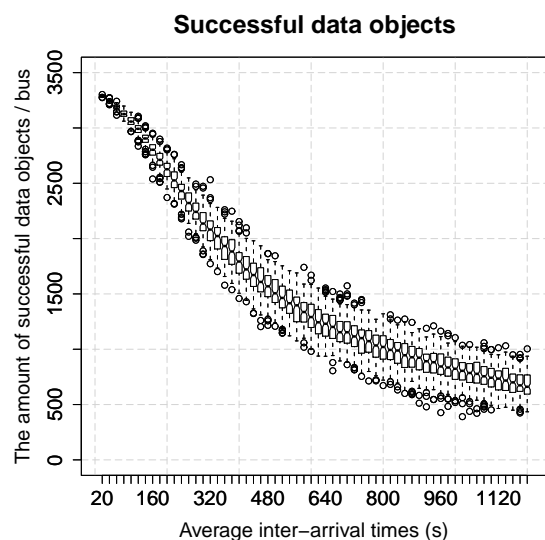
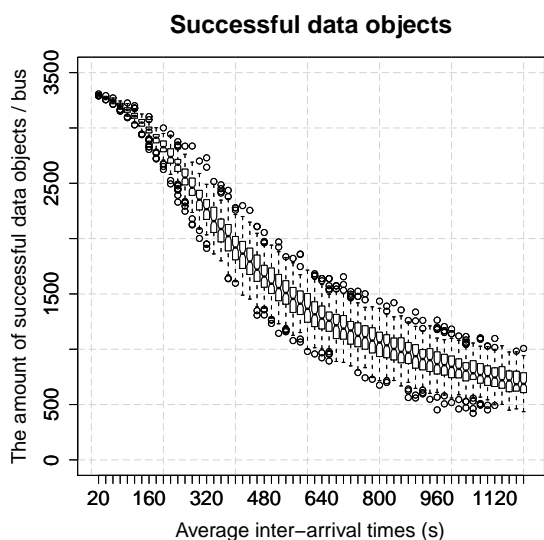
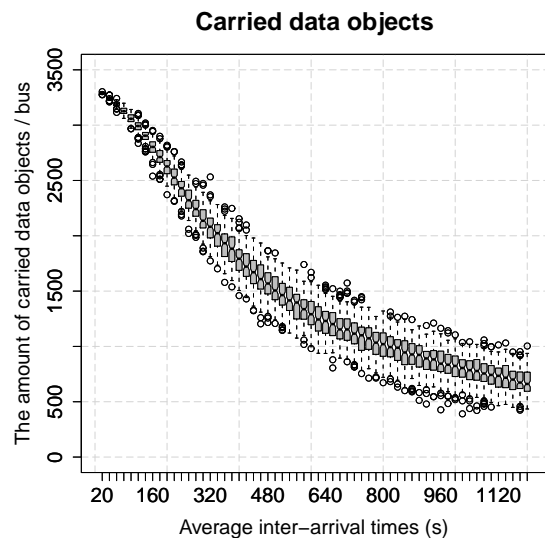
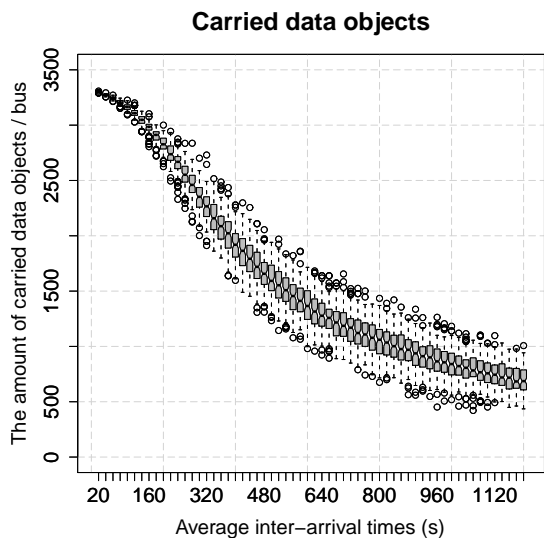


図 8 FPA におけるバスで運搬されたデータ量と許容可能遅延時間内に配送が完了したデータ量

図 9 BPA におけるバスで運搬されたデータ量と許容可能遅延時間内に配送が完了したデータ量

前方のバスにデータを運搬する余裕があったとしても利用できないためである。また、今回のシミュレーションでは示していないが、BPA において、バスに予期しない遅延が発生した場合、データポートのデータを他のバスに再割当てすることができないため、Satisfaction data ratio は今回の結果よりも低下することも予想される。以上の結果より、データポートにデータ配送スケジューリングアルゴリズムを導入することで、遅延がないバスシステムにおいて許容可能遅延時間内の配送効率が向上することを示した。

6. おわりに

本論文では、遅延を許容可能な大容量データを輸送機関網にデータオフローディングし、許容可能遅延時間内にデータ配送を完了するためのデータ配送スケジューリングの提案及び評価を行った。データポートが FCFS でバスへデータ転送を行った場合、バスのデータの運搬量に対して

許容可能な遅延時間内に配送が完了するデータ量の割合が低いことを示した。そこで、許容可能な遅延時間内に配送が完了するデータ量の割合を向上させるために、FPA と BPA のデータ配送スケジューリングの提案を行った。その結果、データポートにおいてデータ配送スケジューリングを用いることで、ユーザからのデータを許容可能遅延時間内に配送可能かどうかを判断できるようになり、結果として、バスが運搬したデータに対して、100 % の割合で許容可能遅延時間内にデータ配送が完了することができることを示した。また、FPA と BPA を比較した場合、前方または後続のバスからの配送スケジュールの違いにより、FPA が BPA よりもわずかに配送効率が向上することを示した。

今後の課題として、本シミュレーション結果は問題を単純化するために多くの仮定を用いている。そのため、より現実的な輸送機関網での通信性能を評価するためには、実際のバスの遅延等を考慮する必要がある。次に、ユーザの

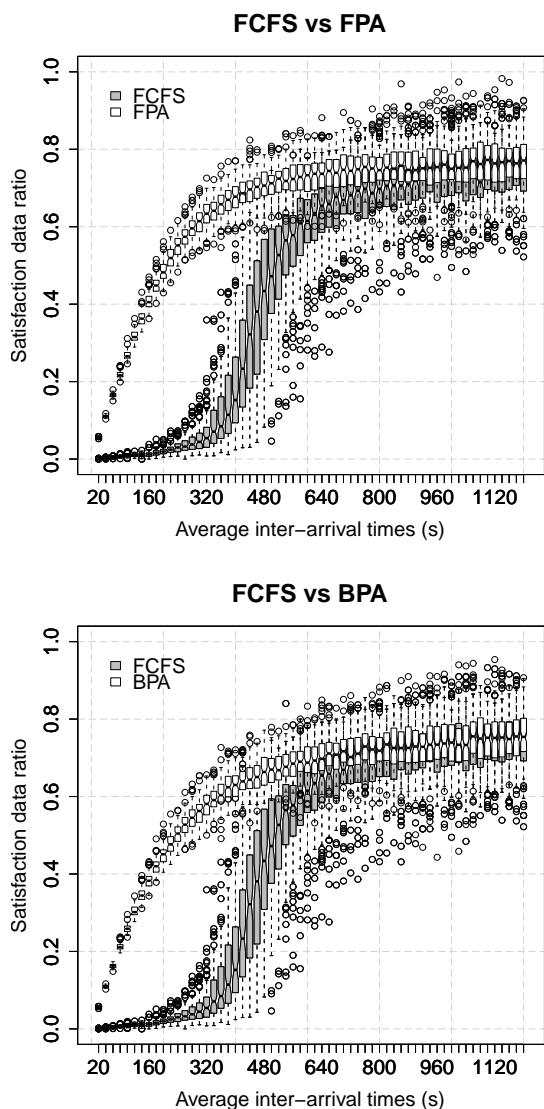


図 10 全生成データ量に対する許容遅延時間内に配送されたデータ量の割合

到着間隔、データサイズ、データの許容遅延時間についての考察が必要となる。本論文ではアップロードの通信フローのみを対象としているため、ダウンロードの通信フローも含めたデータ配送スケジューリングに拡張する必要がある。また、バスの運搬性能を最大限に活用するためには、データのフラグメント化および再構築が重要となり、いつ、どこで、どのように、これらのフラグメント化されたデータを元のデータに再構築するかについての仕組みについて検討する必要がある。

謝辞

本研究に関して議論・助言頂いたカリフォルニア大学ロサンゼルス校 Mario Gerla 教授、Medy Sanadidi 教授に感謝する。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] S. Kashihara, M. Y. Sanadidi, and M. Gerla, "Mobile, Personal Data Offloading to Public Transport Vehicles," Proc. of The Sixth International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU 2012), May 2012.
- [2] "Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2012-2017", White Paper, Cisco Systems, Inc. (2013). 入手先 (http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/white-paper_c11-520862.html) (2013.05.15).
- [3] R. Gass and C. Diot, "An experimental performance comparison of 3g and wi-fi", Proc. of the 11th international conference on Passive and active measurement (PAM'10), pp. 71-80, 2010.
- [4] A. Balasubramanian, R. Mahajan, and A. Venkataramani, "Augmenting mobile 3G using WiFi", Proc. of the 8th international conference on Mobile systems, applications and services (MobiSys'10), pp. 209-222, Jun. 2010.
- [5] K. Lee, I. Rhee, J. Lee, Y. Yi and S. Chong, "Mobile data offloading: how much can wifi deliver?", ACM SIGCOMM Computer Communication Review, Vol. 40, Iss. 4, pp. 425-426, 2010.
- [6] B. Han, P. Hui, V. A. Kumar, M. V. Marathe, G. Pei, and A. Srinivasan, "Cellular traffic offloading through opportunistic communications: a case study", Proc. of the 5th ACM workshop on Challenged networks (CHANTS'10), pp. 31-38, Sept. 2010.
- [7] Delay Tolerant Networking Research Group (DTNNG), <http://www.dtnrg.org/>.
- [8] B. Han, P. Hui and A. Srinivasan, "Mobile data offloading in metropolitan area networks", SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev. 14, pp. 28-30, 2010.
- [9] M. R. Ra, J. Paek, A. B. Sharma, R. Govindan, M. H. Krieger and M. J. Neely, "Energy-delay tradeoffs in smart- phone applications", Proc. of the 8th international conference on Mobile systems, applications, and services (MobiSys'10), pp. 255-270, 2010.
- [10] A. J. Nicholson and B. D. Noble, "Breadcrumbs: forecasting mobile connectivity", Proc. of the 14th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'08), pp. 46-57, 2008.
- [11] TransferJet, <http://www.transferjet.org/>.
- [12] Wireless Gigabit (WiGig), <http://wirelessgigabitalliance.org/>.
- [13] "The network impact of 802.11n", White paper, Aerohive Networks, Inc., 2008. 入手先 (http://www.techniland.fr/downloads/be/documentations/Network_Impact_Of_802.11n.pdf) (2013.05.15).