

将来移動経路の負荷を考慮した モバイルデータオフローディング手法の評価

安孫子悠¹ 望月大輔² 峰野博史³

概要: 近年、スマートフォンの急速な普及でモバイルデータ通信需要が増加している。一方で、モバイルデータ通信では特定の時間帯や地域などに負荷が偏り、トラフィックの収容効率が低下するという課題がある。そこで、遅延をある程度許容するデータに着目し、遅延可能なデータの送信レート制御を行うことで負荷分散を行うモバイルデータオフローディングプロトコル (MDOP) が提案されている。MDOP は、eNB の負荷状態、モバイル端末の移動、データの遅延耐性を考慮し、トラフィックの送信レートを制御することで、時間的、空間的、通信路的の3つの方法でモバイルデータ通信の負荷を分散する通信プロトコルである。これまでのMDOP では、移動後のeNB の負荷状態を考慮せず送信レート制御することで、移動後のeNB に負荷が偏るといった課題があった。本稿では、移動後のeNB に負荷が偏るといった課題を解消するため、将来のユーザ移動情報を考慮した負荷分散手法について検討し、シミュレーションを用いて評価した。評価の結果、将来のユーザ移動情報を用いることで用いない時と比べて、特定の地域に負荷が偏ることを約3%解消可能であることを確認した。

Evaluation of Mobile Data Offloading Method using Load Information on Future Migration Pathway

YU ABIKO¹ DAISUKE MOCHIZUKI² HIROSHI MINENO³

1. はじめに

近年、スマートフォンの性能向上や無線通信技術の急速な発展で多様なシステムが期待され、モバイルデータ通信の需要が増加すると予想されている[1]。モバイルデータ通信の需要増加に伴い、今後は大量のモバイルデータトラフィックを効率的にネットワークへ収容することが重要となる。例えば、モバイルデータ通信では、定期的に撮影した画像データや動画データをクラウドサーバへアップロードするライフログカメラやドライブレコーダ、クラウド上のデータとの同期など、トラフィックの中には遅延をある程度許容するデータ（以下、遅延耐性データ）が存在すると考える[2]。一方、モバイルデータ通信の特徴として、トラフィック集中度合いの激化で発生時間の変動や、都市へのトラフィック集中加速など、特定の時間帯や場所にトラフィックが偏る「局所性」がある[3, 4]。ここで、トラフィックが特定の時間帯に偏る局所性を「時間的局所性」、特定の場所に偏る局所性を「空間的局所性」と定義する。

局所性を解消するために、トラフィックを効率的に収容するには、携帯電話基地局 (eNB : evolved Node B) 等の通信設備の使用率 (負荷) を規定の許容値 (理想負荷) に収

めつつ、一定以上に保つことが望ましい。一方、トラフィックの局所性を考慮して通信設備を増強すると、トラフィック量が少ない地域や時間帯での設備使用率が低下し過剰投資になってしまうという課題がある。これらの課題に対して、遅延耐性を持つデータに対して負荷分散制御を行うモバイルデータオフローディングプロトコル (MDOP : Mobile Data Offloading Protocol) が提案されている[5]。MDOP では、帯域の空いている時間帯に通信を行う時間的オフローディングや接続人数の少ない eNB へ移動後に通信を行う空間的オフローディング等の検討が行われている。しかし、空間的オフローディングではユーザの移動次第で移動後の eNB に負荷が偏る可能性があり、将来のユーザ移動情報を考慮した負荷分散については十分に検討されていない。そこで、本稿では MDOP の空間的オフローディングに将来のユーザ移動情報を用いる手法について提案し評価を行う。

以下、第2章で関連研究について述べ、第3章で提案手法について説明する。第4章で提案手法に関する評価について述べ、第5章で結論と今後の課題についてまとめる。

2. 関連研究

eNB 間の負荷のばらつきを抑えて空間的局所性を解消する方法について、様々な手法が提案されている。主な手法としてセルサイズの異なる eNB を重ねて設置し、接続先の

¹ 静岡大学情報学部
Faculty of Informatics, Shizuoka University
² 静岡大学大学院総合科学技術研究科
Graduate School of Integrated Science and Technology, Shizuoka University
³ 静岡大学大学院情報学領域
College of Informatics, Academic Institute, Shizuoka University

eNB を動的に変更することで空間的局所性を解消する Heterogeneous Network (HetNet) [6]がある。HetNet は、eNB のセル範囲が広域のエリアをカバーするマクロセルに、カバー範囲が狭域なフェムトセルやピコセルなどを重ね合わせることで、ネットワーク全体の許容量を改善することが可能である。また、eNB 台数が増加するため、トラフィックの空間的局所性を解消する。一方で、セル同士が重なることで干渉が発生するため、各 eNB の能力を活用しきれないという課題がある。HetNet を用いた具体的な技術として、Self-Organizing Network (SON) [7]がある。SON は、eNB を追加する際にネットワークの自動設定や自動最適化の機能を持ち、特に負荷分散の自動最適化手法として Mobility Load Balancing (MLB) [8]が提案されている。MLB は UE が接続している eNB の負荷状況と、隣接する eNB の負荷状況を比較し、高負荷な eNB に接続している UE を、低負荷な eNB にハンドオーバーさせることで、空間的局所性を解消する。現実的な移動を模擬したシミュレーション評価では、MLB を用いることで空間的局所性の解消が確認されている。ただし、これらの既存研究はコンテンツデータの遅延耐性に着目した処理は行われておらず、今後普及が見込まれる IoT デバイスがやり取りするデータの遅延耐性を活かした通信の高効率化も可能であると考えられる。

コンテンツデータの遅延耐性に着目し、遅延耐性データを固定通信網へ迂回するアプローチとして、遅延耐性通信 (Delay Tolerant Network : DTN) を用いる方法がある[9]。DTN は、宛先端末と直ちに通信できないコンテンツデータをストレージに一旦蓄積し、Wi-Fi AP などの固定通信網に接続後送信先のデバイスとの通信が可能になったら蓄積しておいたコンテンツデータの送信を再開する手法である。また、UE が Wi-Fi に接続する際に必要となる ID やパスワード入力などの認証動作を自動化し、自動的に接続可能な Wi-Fi AP に接続する手法 Pass-point[10]がある。この Pass-point を用いて、DTN と同様に固定通信網へ遅延耐性データを迂回する手法が提案されており、Pass-point を用いて、遅延耐性データを固定通信網へ負荷分散を行うことで、遅延不可データの通信容量の 15%改善が報告されている [11]。他にも、遅延耐性データを考慮した研究として Dependable Air[12]が提案されている。Dependable Air では狭域なセル範囲を対象とし、遅延耐性を持つコンテンツに対して低負荷な eNB まで短時間の間送信を抑制し、低負荷な eNB で送信を行うことで負荷分散を行う。しかしながら、遅延耐性データを用いて空間的局所性を解消するためには、接続中の eNB と他の eNB の負荷情報を考慮した制御を検討する必要がある。

空間的局所性を解消する負荷分散手法では、接続予定の eNB を考慮して送信レート制御を行うため、UE の移動経路を予測するとともにハンドオーバーの予測が必要である。将来のユーザの移動経路を予測する手法として、決定論的

モデルと確率論的モデルを用いる手法[13]が提案されている。eNB が 30 台ある環境を想定して行ったシミュレーションの結果、特定のユーザにおける移動予測は 75%以上の精度を実現できたと報告されている。また、ユーザの緯度・経度に加え、曜日や気象状況、時刻などの環境情報を考慮して、ユーザの移動モデルを作成する手法[14]も提案されている。さらに、今後は車のカーナビに目的地を設定し、目的地まで自動運転で行くなどの技術[15]が普及すると予想され、何時にどの場所にいるかの情報を正確に得ることが容易になると考える。そこで、本稿では移動予測技術や自動運転技術の利用を想定し、あらかじめ UE の移動経路とハンドオーバーの発生時刻が判明していることを前提とし、将来移動経路の負荷を考慮したオフローディング手法の検討を行う。

3. 提案手法

3.1 概要

本研究では、MDOP 上で動作する、UE の将来移動経路の負荷を考慮したオフローディング手法を提案する。提案手法では接続予定の eNB と接続中の eNB のどちらで通信すべきかを判断するために、移動後に接続する eNB の将来の負荷情報を用いる。将来の負荷情報を用いて負荷分散制御を行うことで、移動後に接続した eNB が移動前の eNB に比べて高負荷の状態では通信を行うことを回避し、移動前の eNB で通信を行う。図 1 のシナリオを例とすると、UE1 の送信レートを制御する場合には移動後の eNB2 の情報を用いる。これまでの MDOP では将来の情報を用いておらず、eNB2 に接続している UE が存在しないために eNB2 の負荷状態は低負荷と判断され、eNB1 では通信を行わずに移動後の eNB2 で通信を行うように空間的オフローディングを行ってしまう。しかし、UE1 の移動後は他の場所から移動してきた UE2~4 の影響で元々存在した eNB1 と比べて高負荷となってしまうため、負荷が eNB2 に偏ってしまうという課題があった。そこで、移動後の eNB2 の将来の負荷情報を用いることで、現在接続中の eNB で時間的オフローディングを行うのが適切なのかを判断し、移動後の eNB に負荷が偏らない負荷分散を実現する。

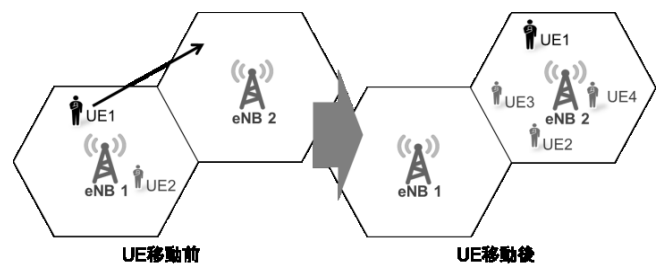


図 1 eNB の現在の状態と将来の状態の例

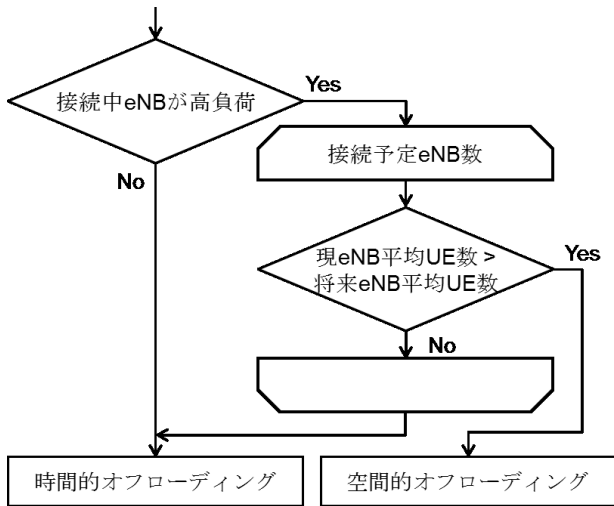


図 2 オフローディング手法の選択フロー

3.2 オフローディング手法の選択

提案手法のオフローディング手法の選択フローを図 2 に示す。まず、接続中 eNB に着目し、低負荷な場合にはすぐに通信が可能であるため時間的オフローディングを用いた送信レート制御を行う。一方で高負荷な場合は、移動後に接続する eNB の将来の負荷が接続中の eNB の負荷と比べて高い場合には時間的オフローディングを行うが、移動後に接続する eNB の将来の負荷が接続中の eNB の負荷と比べて低い場合には、移動後に通信する空間的オフローディングを行うこととする。これを、現時刻から将来情報を使用する期間の接続予定の eNB 分だけ行い、一度でも空間的オフローディングが可能であると判定したら、空間的オフローディングを行う。ここで、将来の eNB の正確な負荷を取得するために、式 (1) と式 (2) で示す平均接続 UE 数を用いて判断を行う。接続中の eNB での滞在期間を n とし、将来接続予定の eNB での滞在期間を m とする。また、接続中の UE 数を $CurrentBsUE$ とし、将来接続予定の接続 UE 数を $EstimatedBsUE$ とする。接続中の eNB の n 秒間の総接続 UE 数を n で割ったものを現 eNB 平均 UE 数 ($AveCurrentBsUEs$) とし、将来接続予定の eNB の m 秒間の総接続 UE 数を m で割ったものを将来 eNB 平均 UE 数 ($AveEstimatedBsUEs$) とする。

$$AveCurrentBsUEs = \frac{\sum_{i=1}^n CurrentBsUE_i}{n} \quad (1)$$

$$AveEstimatedBsUEs = \frac{\sum_{i=1}^m EstimatedBsUE_i}{m} \quad (2)$$

平均 UE 数が多いほど滞在期間中での負荷が高いと予想される。現 eNB 平均 UE 数が将来 eNB 平均 UE 数と比べて大きい場合は、将来接続予定の eNB の方が負荷は低いと予想されるため、空間的オフローディングを行う。一方で、現 eNB 平均 UE 数が将来 eNB 平均 UE 数と比べて小さい場合は、将来接続予定の eNB の方が負荷は高いと予想されるため、時間的オフローディングを行う。

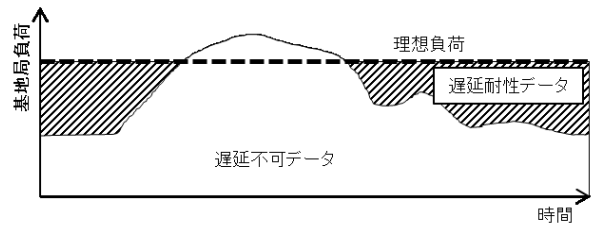


図 3 eNB 負荷内の遅延不可データと遅延耐性データ

3.3 送信レート制御アルゴリズム

MDOP では eNB の負荷を目標値である理想負荷へ近づけるように負荷分散を行う。図 3 は eNB の負荷を示したものである。遅延耐性を持たないコンテンツを遅延不可データとし、MDOP では遅延耐性データを制御するため、遅延不可データは制御の対象外とする。また、遅延耐性データが遅延耐性を超過した場合は最大送信レートで送信を行い、遅延不可データとして扱う。遅延不可データが理想負荷以下るとき、理想負荷と遅延不可データの差を遅延耐性データの使用可能帯域として、理想負荷まで送信を行う。前節で述べたオフローディング手法の選択フローに従ってオフローディング手法の決定後、各オフローディング手法の送信レート制御を行う。以下に、各オフローディング手法での送信レートの決定法について述べる。

時間的オフローディングの場合は以下の式 (3) に従って送信レート $SendRate[Bytes/s]$ を決定する。

$$SendRate = \begin{cases} \frac{I_{Load} - N_{Load}}{T_{UE}} \\ 0 (I_{Load} - N_{Load} < 0) \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 I_{Load} は制御目標値である理想負荷 [Bytes] であり、 N_{Load} は遅延不可データ [Bytes] である。また、 T_{UE} は時間的オフローディングを行っている UE の数である。遅延不可データが理想負荷を下回っている場合は、遅延耐性データの使用できる帯域が空いているため、遅延耐性データの使用できる帯域を時間的オフローディングの適用された UE で等分割する。遅延不可データが理想負荷を上回っている場合は、遅延耐性データの使用できる帯域は空いていないため送信レートは $0[Bytes/s]$ とする。

次に、空間的オフローディングの場合は以下の式 (4) と式 (5) に従って送信レート $SendRate[Bytes/s]$ を決定する。

$$SendRate = \begin{cases} \frac{I_{Load} - N_{Load} - T_{Load}}{P_{UE}} \\ 0 (I_{Load} - N_{Load} - T_{Load} < 0) \end{cases} \quad (4)$$

$$T_{Load} = \sum_{n=1}^{T_{UE}} MaxSendRate_n \quad (5)$$

ここで、 P_{UE} は空間的オフローディングを行っている UE の数である。また、 T_{Load} は時間的オフローディングを行っている UE の総負荷 [Bytes] であり、式 (5) で示す時間的オフローディングを行っている UE の最大送信レート

[Bytes/s] ($MaxSendRate$) の総和である。空間的オフローディングを適用された UE は移動後に低負荷な eNB で通信が可能であるため、現在接続中の eNB での通信は抑制し時間的オフローディングが適用された UE の通信を優先する。時間的オフローディングが適用された全 UE が最大送信レートで通信を行っても、遅延耐性データが使用できる帯域が空いている場合 ($I_{Load} - N_{Load} - T_{Load} > 0$) に限り、残っている帯域を空間的オフローディングが適用された UE で等分割する。

4. 評価

4.1 評価環境

ネットワークシミュレーションを用いて、提案手法は空間的局所性の解消にどの程度の有効性があるか評価を行った。評価は LTE 環境を詳細に模擬できるネットワークシミュレータ Scenargie[16]上で実施した。評価対象は MDOP の制御なし、時間的オフローディングのみ適用時（以下、時間的のみ）、時間的オフローディングに加えて将来情報を用いない空間的オフローディング適用時（以下、将来情報なし）、時間的オフローディングに加えて将来情報を用いる空間的オフローディング適用時（以下、将来情報あり）の結果を比較することで、将来情報を用いる空間的オフローディングの有効性の評価を行った。ここで、将来情報なしでは、空間的オフローディングを行うかの判断は判断時点での接続中の eNB 負荷と接続予定の eNB 負荷を比較して行う。以下に評価シナリオの詳細について述べる。

図 4 に評価トポロジ（阿佐ヶ谷駅周辺）を示す。この評価トポロジは、中央の部分に東西に伸びる電車の路線があり、eNB1 の位置に駅がある。各 eNB は約 1000m 毎に設置した。評価トポロジ内で停止する UE は全体の約 50%とし、評価トポロジ内に一様分布で配置した。移動する UE は、評価トポロジ内や東西の発着点からシミュレーション時間のランダムな時刻に出発して、評価トポロジ内のランダムな場所または東西の発着点まで移動し、目的地に到着後はシミュレーションが終了するまでその場に停止するように設定した。

評価で用いたシミュレーション諸元を表 1 に示す。シミュレーション時間は 4000 秒とし、MDOP 対象の UE 数は 200 台とした。200 台の内、100 台は目的地に向けて移動を行い、残りの 100 台は初期位置に停止し続ける。UE の移動は徒歩または電車で移動するとし、歩行速度は 4km/h、電車速度は 60km/h で一定とした。14 基設置した eNB の許容受信量は全て 1,120KBytes とし、駅周辺の eNB1, 2, 8, 13 は高負荷な eNB、それ以外は低負荷な eNB とした。また、高負荷な eNB には最大受信量の 60%を遅延不可データとして背景負荷を設定し、低負荷な eNB には最大受信量の 20%を遅延不可データとして背景負荷を設定した。

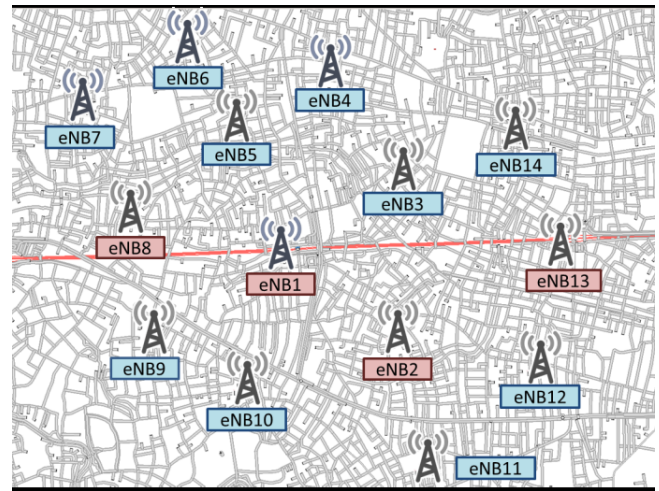


図 4 評価トポロジ（阿佐ヶ谷駅周辺）

表 1 シミュレーション諸元

項目	設定値	
シミュレーション時間	4000[s]	
MDOP 対象の UE 数	200[台]	
最大送信レート	81[KBps]	
移動 UE 数	100[台]	
滞在 UE 数	100[台]	
歩行速度	4[km/h]	
電車速度	60[km/h]	
eNB 数	14[基]	
許容受信量	1,120[KBytes]	
背景負荷	eNB1,2,8,13	672[KBytes]
	eNB3~7,9~12,14	224[KBytes]

表 2 MDOP の設定値

項目	設定値
端末情報送信間隔	1[s]
データの最大蓄積量	無限[Bytes]
理想負荷	1,008[KBytes] (最大受信量の 90%)
低負荷閾値	506[KBytes] (最大受信量の 50%)
将来情報の期間	無限[s]

評価で設定した MDOP の設定値を表 2 に示す。UE の情報の送信間隔は短いほど eNB の負荷の変動に追従できるため、各オフローディング手法の性能比較を行う目的で 1 秒とした。データの最大蓄積量は設けず、コンテンツは無限に蓄積可能とした。eNB の理想負荷と低負荷閾値はそれぞれ eNB の許容受信量の 90%と 50%と設定した。将来情報を使用する空間的オフローディングにて使用する将来情報の期間は無限とし、具体的には判断時の時刻からシミュレ

ーション終了時刻までの情報を使用する。

評価指標として、負荷分散がどの程度達成できたのかを示す負荷分散率 LBP [%]と、eNB 間の負荷のばらつきを示す負荷標準偏差 LSDP[MB]を定義する。負荷分散率 LBP を式 (6) で算出し、負荷分散制御なしのときに理想負荷を超過していた負荷が、負荷分散制御を行うことで何割負荷分散できたかを示す指標とする。ここで、 $ctl_{off}OverLoad$ は負荷分散制御なしの時に理想負荷を超過した負荷量[Byte]で、 $ctl_{on}OverLoad$ は負荷分散制御ありの時に理想負荷を超過した負荷量[Byte]とする。また、理想負荷を超過した負荷量 $OverLoad$ [Byte]を式 (7) で算出し、 eNB_i の負荷 eNB_iLoad_t [Byte]から eNB_i の理想負荷 eNB_iI_{Load} [Byte]を引いたものを、シミュレーション時間内の全 eNB を足したものとす。負荷分散が 0%のときは制御なしと同じ負荷量であり、負荷が理想負荷を超過しており負荷分散が全くされなかった状態である。100%のときは制御なしで理想負荷を超過していた負荷を全て負荷分散できた状態である。

$$LBP = \frac{ctl_{off}OverLoad - ctl_{on}OverLoad}{ctl_{off}OverLoad} \quad (6)$$

$$OverLoad = \sum_{i=1}^{eNBs} \sum_{t=0}^{eindTime} (eNB_iLoad_t - eNB_iI_{Load}) \quad (7)$$

負荷標準偏差 LSD は式 (8) で与えられ、全 eNB のシミュレーション内の負荷の標準偏差を取ることで、eNB 間の負荷のばらつきを示す指標である。ここで、 eNB_iLoad [Byte]は eNB の負荷であり、 $eNBaveLoad$ [Byte]は全 eNB の負荷の平均である。負荷標準偏差が大きいくほど eNB 間の負荷の差が大きく、負荷標準偏差が 0[Byte]のときは全 eNB の負荷の差が無く、空間的局所性がない状態である。

$$LSD = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{eNBs} (eNB_nLoad^2 - eNBaveLoad^2)}{eNBs}} \quad (8)$$

4.2 評価 1 (遅延耐性)

評価 1 では遅延耐性データの遅延耐性が、提案手法の負荷分散性能に与える影響の評価を行った。コンテンツの設定値を表 3 に示す。遅延耐性を 60~3840 秒と変化させ、生成されるコンテンツは 1 分毎に画像が生成されることを想定し、最大送信レートから生成間隔 1 分の半分の時間で UE が送信を完了することのできる 2.43MB とした。負荷分散率を図 5 で、将来情報ありの各オフローディング手法からの向上率を示したものを図 6 に示す。負荷標準偏差を図 7、将来情報ありの各オフローディング手法からの向上率を示

表 3 評価 1 のコンテンツの設定値

項目	設定値
コンテンツサイズ	2.43[MBytes]
コンテンツ生成間隔	60[s]
遅延耐性	60~3840[s]

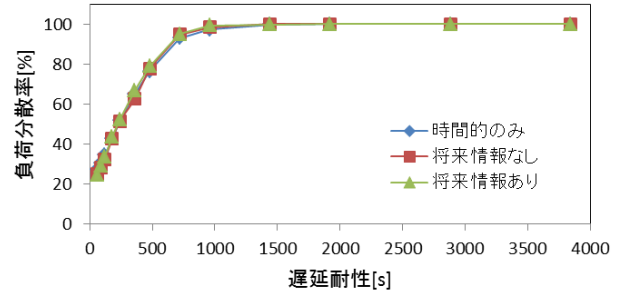


図 5 遅延耐性と負荷分散率の関係

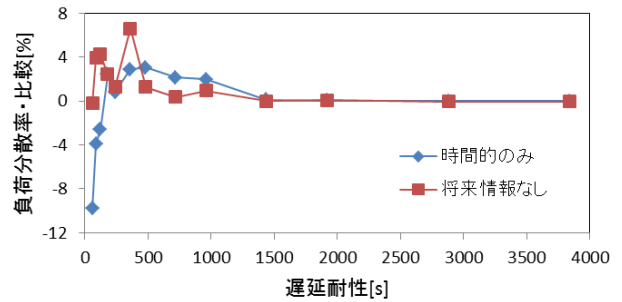


図 6 負荷分散率の将来情報ありとの比較

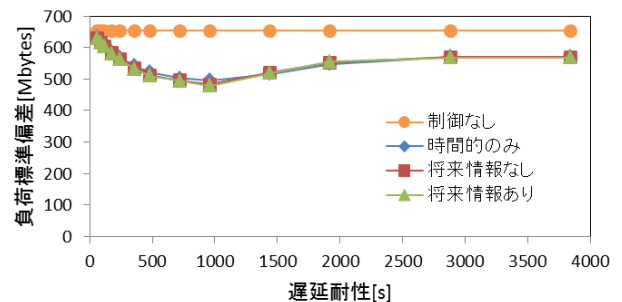


図 7 遅延耐性と負荷標準偏差の関係

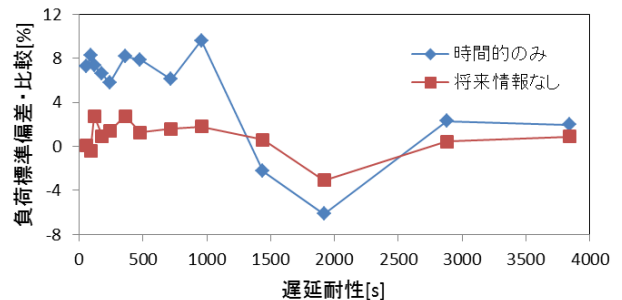


図 8 負荷標準偏差の将来情報ありとの比較

したものを図 8 に示す。図 5 の結果から、どのオフローディング手法でも遅延耐性が長いほど負荷分散率は高くなる。さらに、図 6 の結果から、遅延耐性が約 200 秒から 1500 秒までは、将来情報ありの負荷分散率を他のオフローディング手法と比べても高く、遅延耐性が約 400 秒のとき将来情報ありは時間的のみと比べて約 7%、将来情報なしと比べて約 3%負荷分散率が向上していることを確認できた。図 7 の結果から、どのオフローディング手法でも負荷分散標準偏差は制御なしに比べて小さく、空間的局所性を解消できる。また、図 8 の結果から、遅延耐性が約 1500 秒までは将来情報ありの方が時間的のみに比べて約 8%負荷分散

標準偏差が小さく、将来情報なしに比べて約 3% 負荷分散標準偏差が小さいことから、将来情報を用いることで空間的局所性を解消可能であることを確認した。考察は以下の通りである。

図 5 の結果から、遅延耐性が長くなるにつれて、どのオフローディング手法でも負荷分散率は 100% に近づいている。これは、遅延耐性が長いほど遅延耐性超過を起こしにくく、eNB の負荷を理想負荷以下に制御できたと考える。一方で、遅延耐性が短いときは eNB の負荷が理想負荷以上であったときに、理想負荷以下になるまでコンテンツを保持することができず、結果的に適切な eNB で送信を行うことができなかったコンテンツが遅延耐性超過を起こし、負荷分散率の低下に繋がったと考える。

図 6 の結果から、遅延耐性が約 200 秒までは時間的のみの方が将来情報ありに比べて負荷分散率が低く、約 200 秒以降は将来情報ありの方が時間的のみに比べて負荷分散率は低い。約 200 秒まで時間的のみの方が将来情報ありに比べて負荷分散率が低いのは、将来情報ありでは空間的オフローディングが適用された時点で、適切な eNB まで送信レートが抑制され、適切な eNB に移動してから送信を開始する。このとき、適切な eNB に移動するのに要する時間が遅延耐性以上であるとき、適切な eNB に到着する前に遅延耐性超過が生じ、負荷分散率を低下させてしまう。ここで、評価トポロジの eNB 間は約 1000m であり、シミュレーション諸元の UE の歩行速度は 4km/h であるため、eNB 間の移動には約 900 秒必要となる。そのため、遅延耐性が約 200 秒以下のときは適切な eNB へ移動するのに必要な時間に比べて遅延耐性が極めて小さくなり、将来情報ありでは適切な eNB に接続する前に、遅延耐性超過を生じたと考える。また、約 200 秒以上のときは遅延耐性が長いほど将来情報ありの方が時間的のみに比べて負荷分散率が向上していくことから、適切な eNB に移動するのに要する時間とコンテンツの遅延耐性は負荷分散率と関係があると考えられる。

図 7 の結果から、遅延耐性が長いほどどのオフローディング手法でも負荷標準偏差が小さくなっていき、負荷分散制御で高負荷な eNB の負荷が低負荷な eNB へ負荷分散されている。さらに、空間的オフローディングを行わない時間的のみも負荷標準偏差が小さく、空間的局所性の解消が確認できる。これは、時間的のみでは全ての UE で時間的オフローディングが適用されるため、送信レートが抑制されたまま他の eNB に移動を行う。この結果、意図しない形で空間的オフローディングが行われ、空間的局所性を解消したと考える。

図 8 の結果から、時間的のみに比べて将来情報ありの方が負荷分散標準偏差は小さい。これは、将来情報ありでは移動 UE が現在接続中の eNB に比べて低負荷な eNB に移動予定の時に意図的に送信レートの抑制を行い、低負荷な eNB に接続したら送信を行う。このため、高負荷な eNB で

は時間的オフローディングしか行えない滞在 UE が優先的に送信を行う。また、他の eNB で通信を行うことのできる移動 UE は低負荷な eNB で通信を行う。この結果、負荷分散が行われたと考える。一方で、時間的のみでは空間的オフローディングが適用されていれば必要でなかった送信を高負荷な eNB で行う。そのため、時間的オフローディングしかできない UE が十分に送信を行うことができず遅延耐性超過が生じ、高負荷な eNB に負荷が偏ってしまったと考える。

さらに図 8 の結果から、将来情報なしに比べて将来情報ありの方が負荷分散標準偏差は小さい。これは、将来情報なしではオフローディング手法の選択時の負荷情報のみを用いてオフローディング手法の選択を行うため、適切な eNB に移動を行うと他の eNB から移動してきた他の UE で負荷が偏ってしまう可能性がある。一方で、将来情報ありでは移動後の負荷を考慮してオフローディング手法の選択を行うため、移動後に接続予定の eNB に負荷が偏ると判断した場合は、現在接続中の eNB で送信を行う。移動後の eNB の負荷からオフローディング手法の選択を行うことで移動後の eNB に負荷が偏ることを低減することができ、将来情報なしに比べて負荷標準偏差が小さくなったと考える。

以上から、適切な遅延耐性を設定した場合に将来情報ありでは時間的のみと将来情報なしに比べて、オフローディング率が高く、空間的局所性にも効果があることを明らかとした。さらに、将来情報ありでは遅延耐性が短いときは適切な eNB へ移動する前に遅延耐性を超過し、負荷分散率を低下させてしまうという課題が明らかとなった。この課題に対しては、将来情報の使用期間をオフローディング手法の選択時からシミュレーション終了までと、遅延耐性以上の期間の情報を使用していたため、将来情報の使用期間を遅延耐性までなど有限にすることで一定の改善が可能であると考えられる。

4.3 評価 2 (コンテンツサイズ)

評価 2 ではコンテンツサイズが、提案手法の負荷分散性能に与える影響の評価を行った。コンテンツの設定値を表 4 に示す。コンテンツサイズを 0.405~25.92MB と変化させ、シミュレーション内で生成される総コンテンツサイズが同一となるようにコンテンツ生成間隔も 10~640 秒と変化させた。また、遅延耐性は 960 秒とした。負荷分散率を図 9、将来情報ありの各オフローディング手法からの向上率を示したものを図 10 に示す。負荷標準偏差を図 11、将来情報ありの各オフローディング手法からの向上率を示したものを

表 4 評価 2 のコンテンツの設定値

項目	設定値
コンテンツサイズ	0.405~25.92[MBytes]
コンテンツ生成間隔	10~640[s]
遅延耐性	690 [s]

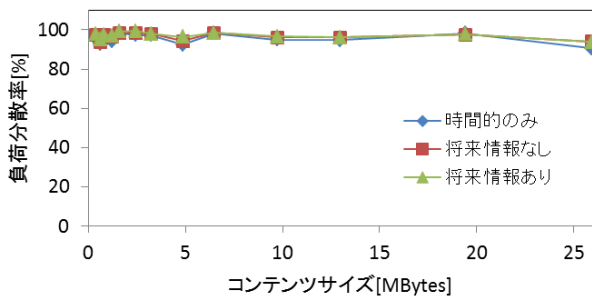


図 9 コンテンツサイズと負荷分散率の関係

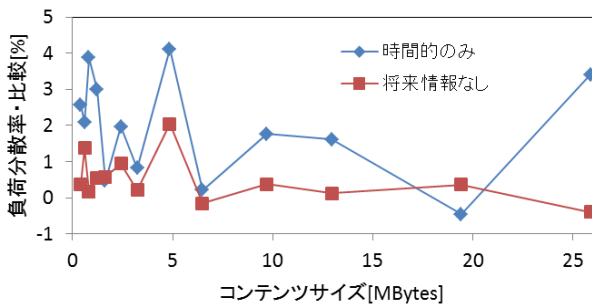


図 10 負荷分散の将来情報ありとの比較

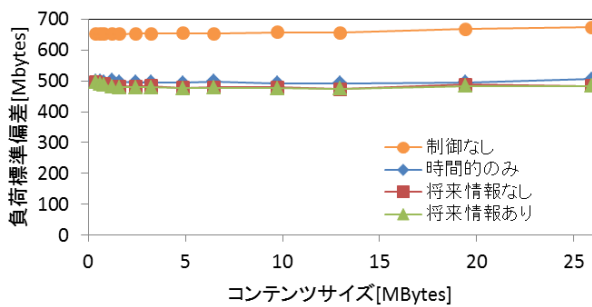


図 11 コンテンツサイズと負荷標準偏差の関係

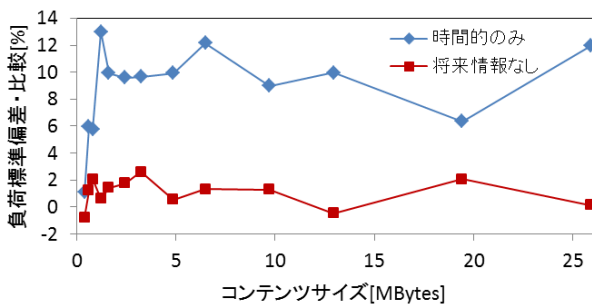


図 12 負荷標準偏差の将来情報ありとの比較

を図 12 に示す。図 9 の結果から、コンテンツサイズに関係なく負荷分散率は約 90% で一定である。さらに、図 10 の結果から将来情報ありの負荷分散率は他のオフローディング手法に比べても高いことを確認できた。また、図 12 の結果から、負荷標準偏差は将来情報ありが最も小さく、図 11 の結果からコンテンツサイズに関係なく空間的局所性を解消可能であることを確認できた。考察は以下の通りである。

図 9 の結果から、負荷分散率はどのオフローディング手法でも約 90% 以上である。これは、評価 2 の遅延耐性は 960 秒であり、図 5 の結果から、遅延耐性が約 1000 秒のときは

負荷分散率が約 100% であり、さらに、評価 2 ではシミュレーション内の総生成コンテンツサイズが同じになるように設定してあるため、どのコンテンツサイズでも負荷分散率が約 90% 以上となったと考える。

図 10 の結果から、コンテンツサイズが約 3, 5, 10, 15MB のときは将来情報ありの負荷分散率が他のオフローディング手法に比べて低いものに対して、その他のコンテンツサイズでは同等の負荷分散率となっている。このことから、eNB 間の移動に要する時間以上の遅延耐性が設定されている時、将来情報ありでは他のオフローディング手法と比べて最低でも同等以上の負荷分散率を達成することが可能である。一方で、コンテンツサイズが約 2, 4, 6MB のとき将来情報ありの負荷分散率が、時間的のみと同等まで低下してしまうのは、評価 2 では総生成コンテンツサイズをコンテンツサイズが増加しても一定にするために、コンテンツサイズが大きくなるほど生成間隔も伸びる。このため、コンテンツの生成されるタイミングが高負荷な eNB に接続開始時と、高負荷な eNB から接続が切り替わる時、と変わる可能性がある。その結果、高負荷な eNB に接続開始時にコンテンツが生成された場合は、高負荷な eNB から接続が切り替わる時に生成されたコンテンツと比べて、コンテンツの送信が抑制されている時間が長く遅延耐性超過を生じる可能性が高くなる。その結果として、時間的のみや将来情報なしと同等の負荷分散率まで低下したと考える。

図 11 の結果から、負荷標準偏差を制御なしと比べて制御を行うことで約 150MB 低減することができた。また、コンテンツサイズに依存せずほぼ一定の性能であることから、総生成コンテンツサイズが同じであればコンテンツサイズは負荷分散率に影響を与えないと考える。

図 12 の結果から、コンテンツサイズが約 2MB 以上では将来情報ありが最も負荷標準偏差が小さいという結果となった。これは、時間的のみでは空間的オフローディングを行わないため、高負荷な eNB の負荷を低負荷な eNB へ負荷分散することができず負荷標準偏差が高くなったと考える。さらに、将来情報なしに比べて小さいのは、移動後の eNB の負荷情報を用いることで将来情報なしで移動後の eNB に偏っていた負荷を、適切な eNB へ負荷分散することができたためと考える。一方で、約 2MB 以下では、将来情報ありの負荷標準偏差は時間的のみと将来情報なしと同等となっている。これは、遅延耐性の超過は生成時刻から遅延耐性時刻まで経過した時に起こり、コンテンツサイズが小さいときは生成間隔も短く、一つ遅延耐性の超過が生じた場合すぐに次のコンテンツも遅延耐性の超過が生じる可能性が高い。このため、適切な eNB に移動中に遅延耐性の超過が生じるコンテンツ数はコンテンツサイズが小さくなるほど高くなり、負荷が偏ったと考える。

以上から、コンテンツサイズが約 2MB 以上であれば負荷分散率や負荷標準偏差に大きな影響を与えないことを明

らかにした。また、コンテンツサイズが約 2MB 以上であれば将来情報ありを用いることで、他のオフローディング手法に比べて空間的局所性を解消することができることを明らかにした。一方で、コンテンツサイズが小さく、生成間隔が短いときは遅延耐性の超過が生じる可能性が高くなり空間的局所性を引き起こしてしまうという課題が明らかとなった。この課題に対して、遅延耐性が短いコンテンツに優先的に送信帯域を割り振るよう優先度を付与する。優先度を付与することで、遅延耐性が長く残っているコンテンツの送信が抑制され、遅延耐性が短いコンテンツの送信を優先し、遅延耐性が短いコンテンツの遅延滞性の超過が生じる可能性が低くなると考える。

5. おわりに

本研究では、空間的局所性を改善するために UE の将来の接続先 eNB の負荷状況を考慮し、長期的な期間での eNB の空間的局所性の解消が可能な空間的オフローディング手法を提案した。シミュレーション評価の結果、将来情報を用いることで、eNB の移動に要する時間に対して遅延耐性がきわめて短くなければ、将来情報を用いないときに比べて将来情報を用いた方が空間的局所性を解消することが可能であることを明らかにした。さらに、将来情報を用いることで、空間的局所性を考慮していない手法に比べて約 8% の空間的局所性を解消が可能であり、空間的局所性を考慮していても将来情報を用いない手法と比べて約 3% の空間的局所性を解消が可能であることを確認した。また、一定以上コンテンツサイズが大きい時は空間的局所性に影響を与えず、将来情報を用いることで空間的局所性を解消可能であることも確認した。一方で、遅延耐性が適切な eNB へ移動に要する時間以上の場合に、負荷分散率が低下するという課題が明らかとなった。今後、更なる空間的局所性の解消に向けて、移動に要する時間を考慮して適切な eNB を選択するために、将来情報の使用する期間の有効な条件を明らかにしていく。

謝辞

本研究は、科学研究補助金基盤研究 (B)「深層強化学習を用いたモバイルデータ 3D オフローディングの研究 (17H01730)」の支援を受けたものである。

参考文献

- [1] Cisco Visual Networking Index.: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, Technical report, Cisco (2015).
- [2] A. Biral, M. Centenaro, A. Zanella.: The challenges of M2M massive access in wireless cellular networks, *Digital Communications and Networks*, vol.1, no.1, pp.1-19 (2015).
- [3] 総務省: 平成 28 年版 情報通信白書(online), 入手先 (<http://www.soumu.go.jp/johotusintokei/whitepaper/ja/h28/pdf/28honpen.pdf>) (2017.04.14).

- [4] NTT ドコモ: 電波政策ビジョン懇親会 ヒアリング資料 (平成 26 年 3 月 25 日) (online), 入手先 (http://www.soumu.go.jp/main_content/000282114.pdf) (2017.05.02).
- [5] 西岡哲朗, 町田樹, 荒井大輔, 大岸智彦, 峰野博史: モバイルデータトラフィックの時間的局所性を解消するモバイルデータオフローディングプロトコルの提案, *情報処理学会論文誌*, vol.58, no.1, pp.2-12 (2017).
- [6] 3GPP TR36.839 v11.1.0.: Technical Specification Group Radio Access Network Evolve Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) Mobility enhancements in heterogeneous networks (Release 11).
- [7] 3GPP TR 36.902 v9.3.1.: Technical Specification Group Radio Access Networks Radio Frequency (RF) system scenarios. Self-configuring and self-optimizing network (SON) use cases and solutions (Release-9).
- [8] S. Hahn, D. M. Rose, T. Küner.: Mobility Load Balancing-AC ase Study: Simplified vs. Realistic Scenarios, Braunschweig, Germany (2014).
- [9] C. P. Mayer and O. P. Waldhorst.: Offloading infrastructure using delay tolerant networks and assurance of delivery, 2011 IFIP Wireless Days (2011).
- [10] S. Hoteit, S. Secci, G. Pujolle, S. Wieltholter, A. Wolisz, C. Ziemlicki, Z. Smoreda.: Quantifying the achievable cellular traffic offloading gain with passpoint hotspots, *Proceedings of the 2014 ACM international workshop on Wireless and mobile technologies for smart cities*. ACM, pp.19-28 (2014)
- [11] aruba.: Wi-Fi Certified passpoint Architecture for Public Access, White Paper, Aruba Networks (2012).
- [12] 坪内和夫, 亀田卓, 平明徳, 末松憲治, 高木直: ディペンダブルエア -異種無線融合ネットワークにおける高精度位置情報を用いたネットワーク選択手法とトラフィックナビゲーション-, *IEICE ESS Fundamentals Review*, Vol.9, no.1, pp.37-46 (2015).
- [13] T. Liu, P. Bahl, I. Chlamtac.: Mobility Modeling, Location Tracking, and Trajectory Prediction in Wireless ATM Networks, *IEEE journal on selected areas in communications*, vol.16, No.6, pp.922-936 (1998).
- [14] J. M. Kim, H. Baek, Y. T. Park.: Probabilistic graphical model based personalroute prediction in mobile environment, *Appl. Math. Inf. Sci.* 6 No.2S, pp.651S-659S. (2012).
- [15] M. B. Ayed.: System for automatically dispatching taxis to client locations, U.S. Patent No.6,756,913, 2004.
- [16] Space-Time Engineering, LLC : Scenarrgie(online), 入手先 (<https://www.spacetime-eng.com/en/products>) (2017.04.14).