

移動体向け自律分散型コンテンツ配信制御方式の評価

森 郁海¹ 田村孝之¹ 徳永雄一¹

概要：移動体向けのコンテンツ配信では、移動体と基地局間の通信が無線であるため、安定したサービス品質を提供するコンテンツ配信制御技術が必要である。我々はこれまでに、単一障害点をなくし、通信のボトルネックとなるバックホールや基地局に負荷をかけないために、コンテンツ要求の優先度制御を移動体のみで行う自律分散型コンテンツ配信制御方式を提案している[1]。本稿では、制御オーバーヘッドを確認するために、バックホール、基地局、移動体における制御メッセージ量のオーダーを既存技術と比較評価する。また、提案方式の特長であるセマフォと通信管理テーブルの利用による配信性能変化を検証するために、シミュレーション評価を実施する。制御オーバーヘッドについては、提案方式のみバックホールや基地局に負荷をかけることなく、配信制御が可能であることを示した。一方、シミュレーション評価では、セマフォと通信管理テーブルの記載内容を調整することで、通信帯域の高効率な利用と、優先度を考慮した配信が両立可能との結論を得た。

Evaluation of Autonomous Distributed Content Delivery System for Mobile Devices

IKUMI MORI¹ TAKAYUKI TAMURA¹ YUICHI TOKUNAGA¹

1. はじめに

近年、日本のデータ通信を中心とした移動通信トラフィック(非音声)は、移動通信事業者各社の加入者数の増加や、大容量プランの導入を受け、年間 1.4 倍のペースで増加している[2]。移動通信事業者各社は基地局の強化や増設を順次実施しているが、今後も増加が見込まれるデータ配信需要への完全な追従は困難と予想され、利用者へのサービス品質の低下が懸念される。

一方、移動体通信利用者の動向をみると、3G/4G では「ヒト」相手の市場(B2C)での利用がメインであったが、5G ではミッションクリティカルな IoT(自動運転、遠隔医療、決済、防犯)の実現に向け、「モノ」相手の市場(B2B2X)での利用を想定している[3]。特に、移動性の高い環境下での通信が求められる自動運転分野において、我が国では ITS(高度道路交通システム)による先読み情報等を活用し、2020 年を目途に SAE^aレベル 3、2025 年を目途に SAE レベル 4 の市場化がそれぞれ可能となるよう、協調領域に係る研究開発を進め、必要な技術の確立を図っている[6]。ITS においては、車外との通信に運転制御に関わる重要情報が流れるが、他方で、自動運転により乗員は運転操作から解放され、オンラインでマルチメディアやゲームを楽しむ機会が増加すると想定される。

以上のように、移動体通信の動向と自動運転市場の拡大から、5G では重要度の異なるコンテンツが、限られた通信帯域の中で大量に通信されると考えられ、通信の優先度制御が重要な課題となる。

2. 従来技術と課題

移動体通信では、バックホール^bや基地局がボトルネックとなる場合が多い。大容量のコンテンツデータを同一基地局配下の複数の移動体に配信する場合、バックホールや基地局でデータの滞留が発生するとサービス品質が悪化する。この問題の解決法として、以下の 2 つのアプローチが存在する[7]。

- MCC(Mobile Cloud Computing)
- MEC(Mobile Edge Computing)

MCC は、古典的な方法であり、広域網上のクラウド環境で配信制御を行う方法である。クラウド上の配信制御装置が、移動体の受信状態を取得し、移動体へのデータ配信に優先度をつける手法[8]等が提案されている。しかし、移動体とクラウドとの伝搬距離が長いこと遅延が大きい(百ミリ秒以上)。また、クラウド上で集中的に配信制御を行うため、制御対象の移動体が増加すると負荷が集中し、サービ

¹ 三菱電機 (株) 情報技術総合研究所
Information Technology R&D Center, Mitsubishi Electric Corporation

^a 米国運輸省道路交通安全局(NHTSA)が米国に拠点を置く自動車技術者協議会 (SAE) のレベル分け[4]

^b 末端の(無線)アクセス回線と中心部の基幹通信網(コアネットワーク/バックボーン回線)を繋ぐ中継回線・ネットワーク

ス品質が低下する恐れがある。加えて、配信制御装置は配信制御のための制御情報を移動体から常に収集する必要がある、配信制御が不要なほど移動体密度が疎なエリアに対しても一律に制御するため、制御オーバーヘッドが高い(図 1)。その他、コンテンツサーバは配信制御装置を介す構成となるため、従来の移動体からの要求に対して応答する動作から、変更を要求する場合があります、既存システムへの適用障壁は高い。

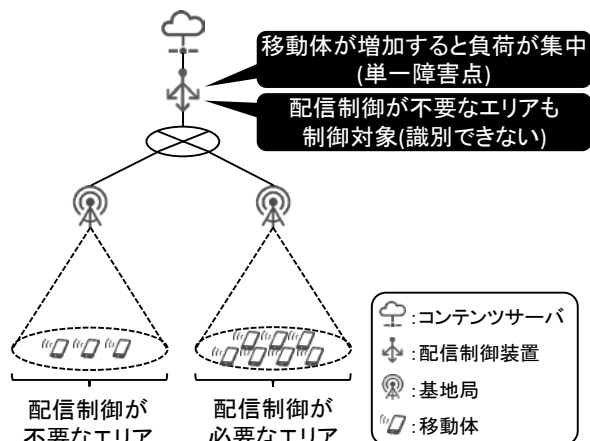


図 1 MCC での配信制御時の課題

一方、MEC は移動体との接点であるエッジ(基地局あるいはその近傍)に計算資源とストレージを配備し、低遅延(数十ミリ秒未満)の IT サービスを提供するものである。MEC で配信制御を行う場合、配信のデッドラインまでの時間や、先行取得済みデータ量のようなアプリケーション層の情報を利用するには、移動体とコンテンツサーバとの連携が必要である(図 2)。また、配信制御を実施する全基地局に対し計算資源とストレージを導入する必要があるため、設備増強に時間を要し、導入コストも高い。加えて、エッジが単一障害点となる可能性がある。

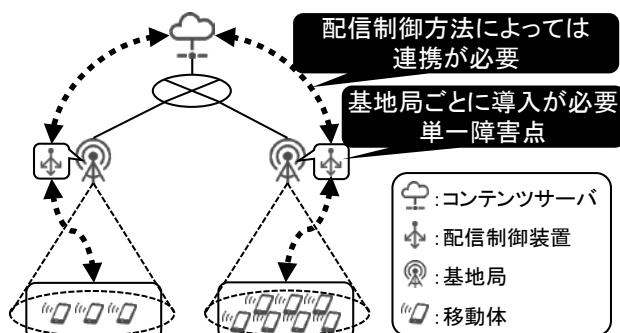


図 2 MEC での配信制御時の課題

類似技術として CDN(Contents Delivery Network)がある。CDN では、コンテンツのキャッシングを行う CDN ノードを移動体の近傍に配置し、コンテンツサーバと連携して移動体への低遅延・大容量通信を実現する。従って、CDN は MEC の一種とみなせる。ここまでのまとめとして、表 1 に

MCC と MEC の比較表を示す([7]より抜粋)。

表 1 MEC と MCC の比較([7]より抜粋)

	MEC	MCC
サーバ H/W	・適度なリソースを持つ小規模なデータセンター	・大規模なデータセンター(高性能な多数のサーバ群)
サーバ配置	・無線 GW/ルータ/基地局と共同配置	・大規模な専用建屋
移動体との距離	・短い(数十～数百メートル)	・長い(場合により大陸を横断)
バックホール使用量	・少ない(輻輳を回避)	・多い(輻輳が発生)
システム管理	・階層型管理(集中/分散型)	・集中型管理
遅延	・数十ミリ秒未満	・百ミリ秒以上
IT サービス	・遅延に厳しい演算処理を持つもの ・拡張現実(AR)、自動走行、対話型オンラインゲーム等	・遅延に寛容な演算処理を持つもの ・SNS、電子商取引、モバイルヘルス、モバイル学習等

MCC や MEC 以外のアプローチとして、広域網に SDN(Software Defined Networking)や NFV(Network Functions Virtualization)などのネットワーク仮想化技術を適用し、高度なルーティングによる配信制御方法も存在する[9]。SDN では、コントロールプレーン(SDN コントローラ)とデータプレーン(SDN 対応スイッチ)を分離する。コントロールプレーンは、データプレーンから得た通信内容を基に制御ルールを生成し、データプレーンに送付する。データプレーンは、送付された制御ルールを自身のフローテーブルに記録し、通信データが到着するとフローテーブルに従いルーティングする。この動作により、俯瞰的な経路制御が可能となり、輻輳/故障箇所の回避やパケット配送の高度なスケジューリングを実現する。また、ネットワーク機器を NFV により仮想化することで、スイッチやルータの機能に加えて、ファイアウォールやロードバランサ等の機能を実装することができる。しかし、SDN コントローラが単一障害点となるので、MCC と同様に移動体数に対するスケーラビリティの課題や、配信制御が不要なエリアも一律に制御する問題が残る。加えて、SDN 対応機器への置き換えが必要となり、スモールスタートには不向きである(図 3)。

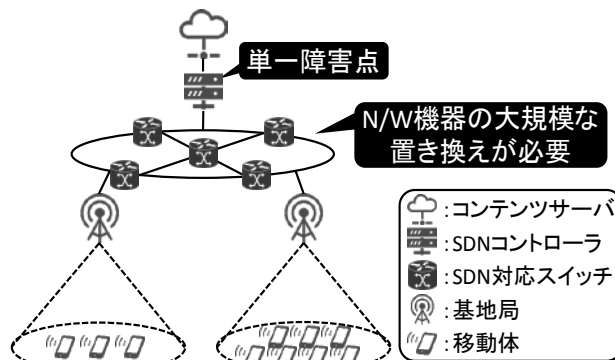


図 3 SDN での配信制御時の課題

理想的なコンテンツ配信制御は、単一障害点がなく、移動体数に対するスケーラビリティを確保でき、かつ、既存システムとの親和性のために、コンテンツサーバの動作変更を要求しないものである。MCC, MEC および SDN では、いずれも単一障害点が存在し、MEC 以外の方式では移動体数に対するスケーラビリティを確保できないおそれがある。そして、多くの場合、コンテンツサーバの動作変更を要求する。

我々は、これらの課題を解決するために、[1]において、自律分散型コンテンツ配信制御方式を提案している。

3. 自律分散型コンテンツ配信制御方式

自律分散型コンテンツ配信方式[1](以降、「本方式」と表記)は、配信制御が必要なエリアに対してのみ、移動体自身が送信するコンテンツサーバへの接続要求のタイミングと通信量だけを調整する。この動作により、制御オーバーヘッドを削減しつつ、コンテンツサーバの動作変更を不要とする。また、前述の調整は、移動体同士で自律分散的に実施するため、単一障害点がなく、移動体数に対するスケーラビリティを持つ。

図 4 に本方式の動作概要を示す。

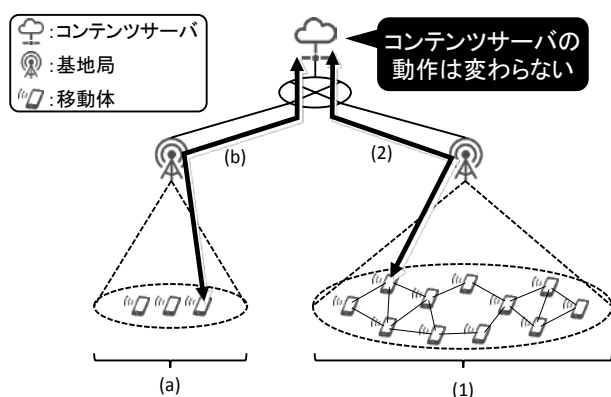


図 4 本方式の動作概要

コンテンツサーバとの通信を必要とする移動体の主要な動作は、以下ようになる(図 4 中の番号・アルファベットと対応)。

■ 配信制御が不要なエリアの動作

- (a) 移動体密度を測定し、配信制御が不要(移動体密度が疎である)と判定
- (b) 配信制御を実施せず、直接コンテンツサーバへ接続

■ 配信制御が必要なエリアの動作

- (1) 移動体密度を測定し、配信制御が必要(移動体密度が密である)と判定。配信制御の必要性判定時に構築したアドホックネットワークを使用して、移動体同士で通信権の獲得を試行することで、コンテンツサーバへの接続タイミングを調整

- (2) 通信権を獲得した移動体はコンテンツサーバと予め決められた時間(あるいはデータ量)以内で通信

図 5 は、配信制御処理の詳細を示したものである。

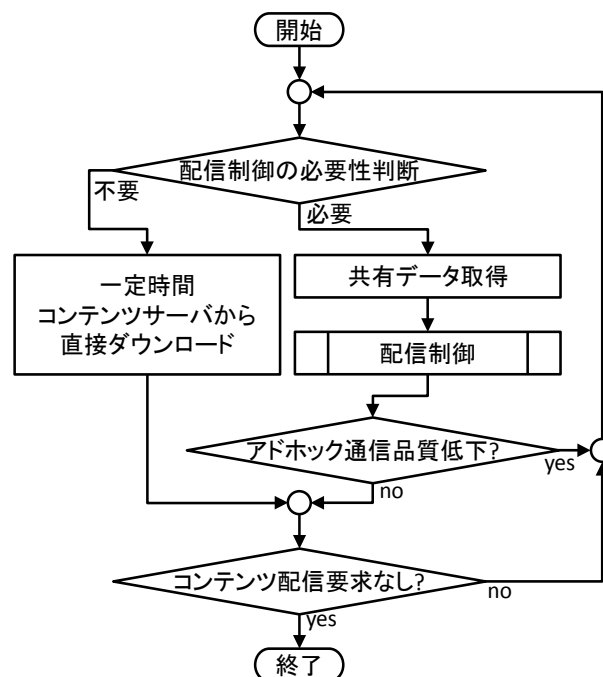


図 5 配信制御全体フロー

まず、アプリケーションからコンテンツサーバへの接続要求が発生した時、移動体はアドホックネットワークへの参加処理を試行し、配信制御の必要性判断(図 6)を実施する。

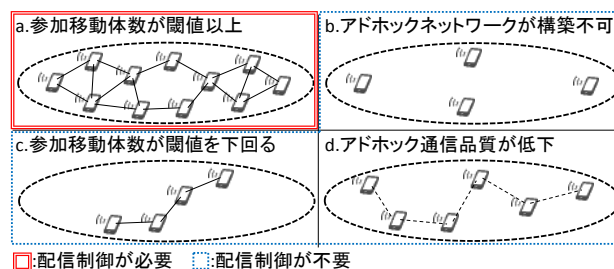


図 6 配信制御の必要性判定([1]より抜粋)

配信制御が不要と判断した場合、配信制御処理を実施せず、一定時間コンテンツデータをコンテンツサーバから直接ダウンロードする。要求すべきコンテンツデータがあれば、配信制御の必要性判断から再実行する。一方、配信制御が必要と判断した場合、アドホックネットワークの参加移動体と配信制御用に共有しているデータ(以降、「共有データ」と呼ぶ)の取得を実行する。参加移動体から共有データを取得できない場合は、予め定められた値で初期化した共有データを生成する。共有データの取得あるいは作成後、配信制御を実行(詳細は後述)する。配信制御の実行途中においてアドホックネットワーク上での制御データの交換が失敗

(アドホック通信の品質が低下した)し、かつ、要求すべきコンテンツデータがある場合は、配信制御の必要性判断から再実行する。このとき、アドホック通信品質低下が改善されていなければ、直接コンテンツサーバよりコンテンツをダウンロードする動作に移移する。

配信制御の手順を説明する。コンテンツサーバとの通信が必要な移動体は、配信のデッドラインまでの時間や、先行取得済みデータ量等からデータ通信優先度を算出する。次に、データ通信優先度 i を持つ移動体は共有データ中の通信管理テーブル(表 2)を参照して、待機時間 X_i (但し、 $X_i \geq X_{i+1}$, $0 < i < n-1$, $i, n \in \mathbb{N}$)を特定し、待機する。なお、データ通信優先度 i は、大きいほど優先度が高い。待機後、移動体は通信権を取得するため、セマフォ P 操作 $\circ$ を実行しセマフォ値を共有データに保存する(図 7①)。セマフォ P 操作が失敗した場合、アドホック通信品質が低下したとみなし、処理を終了する。セマフォ P 操作が成功すると、通信管理テーブル(表 2)に記載された通信時間 Y_i (但し、 $Y_i \leq Y_{i+1}$, $0 < i < n-1$, $i, n \in \mathbb{N}$)を上限にコンテンツサーバからコンテンツをダウンロードする(図 7②)。ダウンロード後、通信権を返却するため、セマフォ V 操作 $\bullet$ を実行し、セマフォ値を共有データに保存する(図 7③)。なお、セマフォ V 操作の成否にかかわらず処理は終了するが、失敗した場合はアドホック通信品質の低下が原因とみなす。

表 2 通信管理テーブル

データ通信優先度	待機時間	通信時間(最大)
1	X_1	Y_1
2	X_2	Y_2
...	...	...
n	X_n	Y_n

※ $X_i \geq X_{i+1}$, $Y_i \leq Y_{i+1}$ ($0 < i < n-1$, $i, n \in \mathbb{N}$)とする

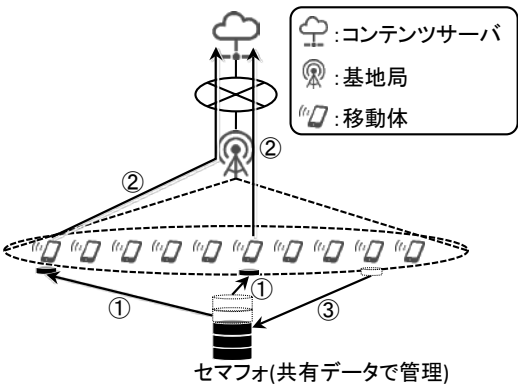


図 7 セマフォによる配信制御([1]より抜粋)

通信管理テーブルは、優先度制御に係る重要なパラメータである。通信管理テーブルを移動体間で同期しなくても、本方式は動作するが、移動体密度やコンテンツサーバとの

通信内容を考慮し、変更する方が効果的である。具体的には、ランダムに選出された代表移動体が、各移動体からコンテンツサーバとの通信に関する統計情報を収集し、通信管理テーブルを更新する方法が考えられる。代表移動体が、既存の通信管理テーブルと通信の統計情報を比較する。データ通信優先度に対する通信量の偏りを検知した場合は、データ通信優先度に対する通信量が一定となるように、テーブルエントリを細分化・集約し、全体の待機時間と通信時間の傾斜を調整する。この時、コンテンツのメタデータからデータ通信優先度の算出式も変更する。

セマフォは、分散トランザクションを用いて実現できる。例えば、Chord[10]と二相コミットを使用して、セマフォの P/V 操作のトランザクションを管理する。また、同時多発的なネットワーク障害を軽減するために、移動性の高さに応じて適切なアドホック通信方式を選択することも重要である(DSR[11]より AODV[12]の方が移動性に強い特性を持つ)。なお、本方式では、トランザクションが失敗した場合でも、アドホック通信品質が低下した(移動体密度が疎となった)とみなし、配信制御を停止し即座にコンテンツサーバとの直接通信に切り替えることで、通信の切断を防止する。以上が、本方式の動作である。次に、これらの動作の有効性を検証するための評価について説明する。

4. 評価

評価では、本方式の制御オーバーヘッドの大きさと、配信における優先度制御の有効性を確認する。

4.1 制御オーバーヘッド評価

本方式の制御オーバーヘッドを確認するために、配信制御に本方式、MCC、MEC、SDN を使用した時の、バックホール、基地局(エッジ)、移動体に流れる制御メッセージ数のオーダー(通信量)を求める。表 3 は、基地局数を N 、基地局配下の移動体数を M 、基地局ごとの配信制御が必要である確率を表す確率変数を p ($0 \leq p \leq 1$)、SDN 対応スイッチごとのフローテーブルに制御ルールが存在しない確率を表す確率変数を q ($0 \leq q \leq 1$)とした場合の通信量の一覧である。各方式の通信量の算出方法は、付録 A.1~付録 A.4 を参照のこと。

表 3 方式ごとの制御メッセージの通信量

	本方式	MCC	MEC	SDN
バックホール	0	$O(MN)$	0	$O(qS)$
基地局	0	$O(M)$	$O(M)$	0
移動体	$O(pM)$	$O(1)$	$O(1)$	0

MCC、MEC、SDN は、データ通信のボトルネックとなるバックホール、基地局いずれか、または両方に制御メッセージが流れるのに対し、本方式では流れることがない。ま

c セマフォ値をデクリメント
d セマフォ値をインクリメント

た、配信制御が必要である状況が稀な場合($p \ll 1$)、制御メッセージが抑制されることがわかる。

4.2 優先度制御の有効性評価

本方式のデータ通信優先度による配信制御の性能を定量的に評価するために、シミュレーション評価を行う。本稿では、セマフォと通信管理テーブルの利用による配信性能の変化を検証するために、以下のように条件を限定して評価する。

- 移動体は同一基地局の通信範囲内に留まる
- 配信制御が必要なエリアのみを対象とする
- アドホック通信は安定しているものとし、通信遅延、計算処理等のオーバーヘッドは考慮しない
- 移動体の参加と離脱は発生しないものとし、通信遅延、計算処理等のオーバーヘッドは考慮しない

比較対象は、優先度制御を行わないラウンドロビン方式とした。

4.2.1 シミュレーションモデル

ラウンドロビンでは、コンテンツサーバは、移動体からの配信要求を無制限に受け入れるものとし、全移動体に対してラウンドロビン方式で通信時間を割り当てる(図 8)。なお、各移動体の配信要求は、確率 50%の一様分布に従い発生するものとする。



図 8 ラウンドロビンの通信時間割り当て例

本方式では、アドホックネットワークを構成する移動体数は固定とし、配信制御が必要な状況のみを対象とする。各移動体で確率 50%の一様分布に従い配信要求が発生するものとし、待機、送信権獲得(セマフォ P 操作)、通信(同時に接続している移動体数でラウンドロビン)、送信権返却(セマフォ V 操作)の順で処理する(図 9)。

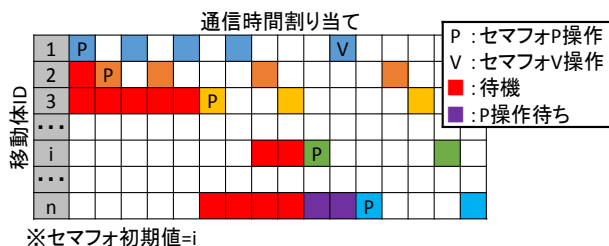


図 9 本方式の通信時間割り当て例

4.2.2 評価項目

データの通信優先度に応じた配信性能、通信帯域の利用効率、性能のばらつきを確認するために、以下の項目を測定する。

- データ通信優先度別のデータ配信完了回数
(ダウンロードが完了した配信の総数)
- 移動体全体のデータ配信完了回数
- データ通信優先度別のデータの配信要求発生からダウンロード完了までの平均所要時間と標準偏差

データの通信優先度に応じた配信性能については、データ配信完了回数がデータ通信優先度に比例することを確認する。加えて、通信管理テーブルのパラメータによる配信性能への影響を確認する。通信帯域の利用効率については、各移動体のデータ配信完了回数の総和が大きいくほど、単位時間内での配信スループットが高くなるため、利用効率が良いと判定する。性能のばらつきについては、データ通信優先度ごとの平均所要時間の標準偏差が小さいほどばらつきが少ないと判定する。

4.2.3 評価パラメータ

シミュレーションパラメータの一覧を表 4 に示す。可変値はセマフォの初期値と通信管理テーブル内の待機時間の有無である。セマフォ操作におけるトランザクションのオーバーヘッドは 0 とする(セマフォ P 操作のブロック時間のみ考慮する)。

表 4 シミュレーションパラメータ

項目	値	備考
ノード数	20	
シミュレーション時間(秒)	600	
ラウンドロビンのタイムクォンタム(ミリ秒)	1	
リクエスト発生評価間隔(秒)	10	・この間隔で確率 50%の一様分布で要求が発生 ・通信中の場合は、除外 ・乱数シードはノードごとに一意に設定
基地局通信帯域(ビット/秒)	78,643,200	・LTE UE カテゴリー 3[13]、帯域幅 10MHz 使用時で、下り 75Mbps
要求データ量(バイト)	9,830,400	・約 10 秒分のデータ(実効速度×10 秒) ・実効速度=基地局通信帯域÷接続ノード数 ・接続ノード数の期待値は、一様分布のためノード数の 50%
セマフォの初期値	1, 5, 10, 20	・ノード数の 5%, 25%, 50%, 100%
通信管理テーブル	待機時間あり、なし	・待機時間ありのエンタリは、表 5 参照 ・待機時間なしのエンタリは、表 6 参照

表 5 通信管理テーブル(待機時間なし)

データ通信 優先度	待機時間 (ミリ秒)	最大通信時間 (ミリ秒)
VERY_HIGH(5)	0	500
HIGH(4)	0	400
NORMAL(3)	0	300
LOW(2)	0	200
VERY_LOW(1)	0	100

表 6 通信管理テーブル(待機時間あり)

データ通信 優先度	待機時間 (ミリ秒)	最大通信時間 (ミリ秒)
VERY_HIGH(5)	0	500
HIGH(4)	100	400
NORMAL(3)	200	300
LOW(2)	300	200
VERY_LOW(1)	400	100

4.2.4 評価結果

図 10 は、データ通信優先度別の配信完了回数の変化を示したものである。セマフォ(ノード数の 100%)+待機時間なしでラウンドロビンと全く同じであることは自明である。データ配信完了回数は、厳密にはデータ通信優先度に比例していないことがわかる。

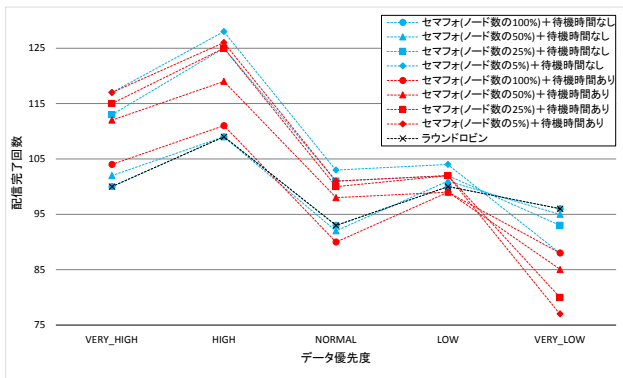


図 10 データ配信優先度配信完了回数の比較

図 11 は、移動体全体の配信完了回数の変化を示したものである。セマフォ(ノード数の 5%)+待機時間なしの場合が最も多いことがわかる。

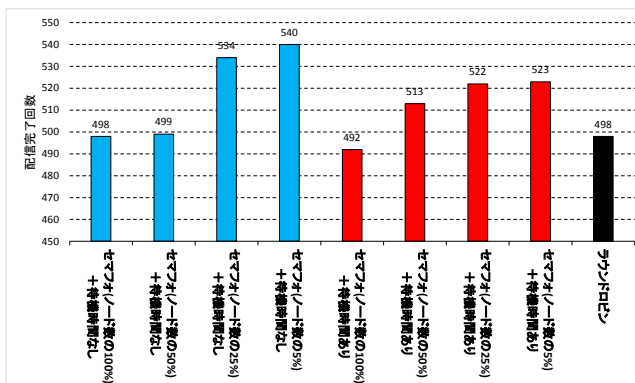


図 11 配信完了回数の比較(全体)

図 12 は、データ通信優先度別の平均所要時間と標準偏

差の変化を示したものである。棒グラフのひげは、平均値から±標準偏差の範囲を表している。ラウンドロビンではほぼ所要時間が変わらないのに対し、本方式ではセマフォ(ノード数の 5%)+待機時間ありの場合に高優先度ほど標準偏差が低く、平均所要時間が短いことがわかる。但し、前述のとおり、待機時間があると帯域の利用効率が若干落ちることに注意する。

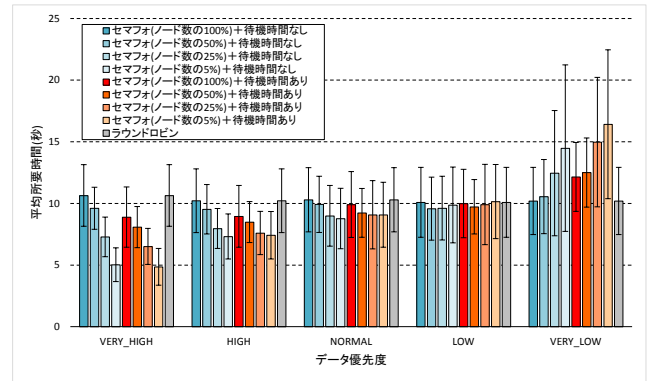


図 12 平均所要時間と標準偏差の比較

5. 考察

データの通信優先度に応じた配信性能について、優先度制御の影響因子がセマフォと待機時間の大きさであることが確認できた。次に、配信性能の傾斜の度合いを確認する。性能傾斜を数式 1 と定義する。なお、 $\#D(X)$ はデータ通信優先度 X における配信完了回数である。

$$\text{性能傾斜}(\%) = \frac{\#D(\text{VERY_HIGH}) - \#D(\text{VERY_LOW})}{\#D(\text{NORMAL})} \cdot 100 \quad \dots\dots (数式 1)$$

図 13 は、セマフォと待機時間の組み合わせごとの性能傾斜を示したものである。待機時間の有無で 11.5%~20%, セマフォの値で 21.8%~23.8% の性能傾斜の差が確認できる。この結果から、待機時間とセマフォを調整することで、性能傾斜を詳細に調整できる見込みを得た。

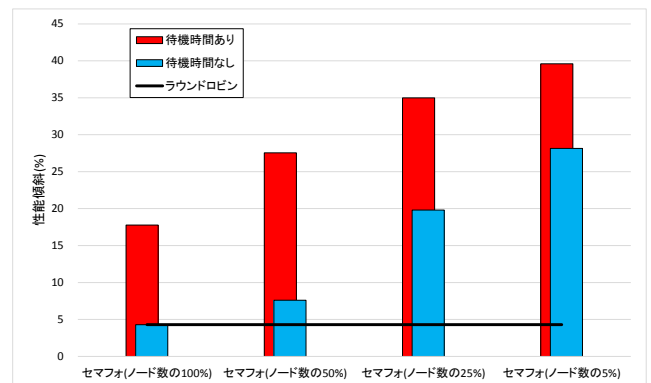


図 13 性能傾斜

次に、通信帯域の利用効率については、セマフォの値と待機時間が小さいほど利用効率が高いことがわかる。セマフォの値を小さく設定することで、データ通信優先度の高い通信が多く割り当てられたため、スループットが上昇し

たとえられる。加えて、待機時間を無くすことで、通信が発生しないタイミングが最小に抑えられたことも要因の一つと推測できる。

最後に、性能のばらつきについて述べる。平均所要時間は、待機時間がありセマフォの値が小さいほど、データ通信優先度による差が大きい。また、標準偏差は、セマフォの値が小さいほど、データ通信優先度の高い通信のばらつきが小さく、データ通信優先度の低い通信のばらつきが大きい傾向があるが、待機時間の有無による影響は弱い。これらは、高優先度の配信が、低優先度の配信を抑制することにより起因する。つまり、高優先度の配信を優先すると、低優先度の配信と衝突する確率が上がり、結果的に低優先度の配信が待たされ、ばらつきが大きくなる。但し、待機時間の有無は、配信の衝突確率への直接的な影響が弱いことから、移動体間での平等性を維持しながら所要時間への性能差を調整する場合に設定するとよいと考えられる。以上の結果から、セマフォの値や待機時間を調整することにより、ばらつきの度合いを制御可能である見込みを得た。

6. まとめ

本稿では、コンテンツ要求の優先度制御を移動体のみで行う自律分散型コンテンツ配信制御方式について、以下の2点の評価を実施した。

- バックホール、基地局、移動体における制御メッセージ量の比較評価
- セマフォと通信管理テーブルを変化させた際の性能評価

制御オーバーヘッドについては、自律分散型コンテンツ配信制御方式のみバックホールや基地局に負荷をかけることなく、配信制御が可能であることを示した。一方、シミュレーション評価では、セマフォと通信管理テーブルの記載内容を調整することで、通信帯域の高効率な利用と、優先度を考慮した配信が両立可能との結論を得た。

今後は、自律分散型コンテンツ配信制御方式の実用段階での課題を整理し、さらなる改良を行う予定である。

参考文献

- [1] 森郁海, 田村孝之: 移動体向け分散型コンテンツ配信制御方式の提案, 情報処理学会第80回全国大会, 第3分冊, pp.41-42(2018).
- [2] 総務省: 情報通信統計データベース 我が国の移動通信トラヒックの現状, 総務省(オンライン), 入手先 <www.soumu.go.jp/johotsusintokei/field/data/gt010602.pdf> (参照 2018-04-03).
- [3] 総務省: 情報通信白書平成29年度版 第1章 第3節 オンラインプラットフォームとデータ活用, 総務省(オンライン), 入手先 <http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h29/pdf/n1300000.pdf> (参照 2018-04-03).
- [4] 日経 BP 社: 自動運転の未来 2016-2020, 日経 BP 未来研究所(オンライン), 入手先 <http://www.nikkeibp.co.jp/lab/jidounten2

016/index.html> (参照 2018-04-03).

- [5] 国土交通省 自動車局 技術政策課: 自動運転レベル分けの改正案について, 国土交通省(オンライン), 入手先 <http://www.mlit.go.jp/common/001174138.pdf> (参照 2018-04-03).
- [6] 内閣府 政策統括官(科学技術・イノベーション担当): 戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)自動走行システム研究開発計画, 内閣府(オンライン), 入手先 <http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/keikaku/6_jidousoukou.pdf> (参照 2018-04-03).
- [7] Mao, Y., You, C., Zhang, J., Huang, K. and Letaief K. B.: A survey on mobile edge computing: The communication perspective, IEEE Commun. Surveys Tuts., vol. 19, no. 4, pp. 2322-2358(2017).
- [8] 配信システム, 三菱電機, 特開 2005-33548(2005).
- [9] Nguyen, V.G., Do, T.X. and Kim, Y.H.: SDN and virtualization-based LTE mobile network architectures: A comprehensive survey, Wireless Personal Communications, vol. 86, no. 3, pp. 1401-1438(2016).
- [10] Kunzmann, G., Binzenhofer, A. and Henjes, R.: Analyzing and Modifying Chord's Stabilization Algorithm to Handle High Churn Rates, IEEE Xplore, Vol.2, pp. 885-890(online), DOI: 10.1109/ICON.2005.1635633 (2005).
- [11] Johnson, D., Hu, Y. and Maltz, D.: The Dynamic Source Routing Protocol (DSR) for Mobile Ad Hoc Networks for IPv4, IETF (online), available from <https://www.ietf.org/rfc/rfc4728.txt> (accessed 2018-04-03).
- [12] Perkins, C., Belding-Royer, E. and Das, S.: Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing, IETF (online), available from <https://www.ietf.org/rfc/rfc3561.txt> (accessed 2018-04-03).
- [13] 3GPP: LTE ue-Category, 3GPP (online), available from <http://www.3gpp.org/keywords/acronyms/1612-ue-category> (accessed 2018-04-03).
- [14] Stoica, I., Morris R., Karger D., Kaashoek M. F. and Balakrishnan H.: Chord: A scalable peer-to-peer lookup service for internet applications, ACM SIGCOMM'01, vol. 31, no. 4, pp. 149-160 (2001).

付録

付録 A.1 本方式の制御メッセージ数のオーダー

本方式では、以下の処理において、移動体間でのみ制御メッセージ交換が発生する。

- 移動体の参加
- 参加移動体数の把握
- 分散トランザクション(セマフォ P/V 操作)
- 移動体の離脱

アドホックネットワークの維持・管理に Chord を使用する場合、移動体の参加と離脱に要する制御メッセージ数のオーダーは、基地局配下の移動体数を M とすると、高々 $O(\log^2 M)$ である[14]。

参加移動体数の把握に必要な制御メッセージ数のオーダーは、全ての参加移動体に問合せを行う必要があるため $O(M)$ である。

分散トランザクションに必要な制御メッセージ数は、2相コミットを使用する場合で $4M$ (セマフォ P/V 操作各々で $2M$ 個の制御メッセージが必要)であるため、そのオーダーは $O(M)$ である。

ここで、Chord では、オーバレイネットワークの健全性

の維持のため、安定化プロトコルが使用される。安定化プロトコルは、移動体の健全性を確認するため、一定時間ごとに移動体間で生存確認を行う。安定化プロトコルで使用する制御メッセージ数は、SuccessorListのエントリ数(レプリケーション数に相当)を r とすると、 rM となり、そのオーダーは $O(M)$ となる。

さらに、アンダーレイネットワーク(実際の通信で使用するアドホックネットワーク)では、P2P オーバレイネットワーク上に流れるメッセージの数倍(ホップ数に依存)となる場合がある。

但し、配信制御が不要な状況では、分散トランザクションに必要なメッセージは発生せず、移動体の参加と離脱も積極的に管理しない(churn 率が高い場合は、P2P ネットワークそのものを維持しない)。

従って、本方式の制御メッセージ数のオーダーは、基地局ごとの配信制御が必要である確率を表す確率変数を $p(0 \leq p \leq 1)$ とすると、 $O(pM)(\because M > \log^2 M)$ である。

付録 A.2 MCC の制御メッセージ数のオーダー

MCC では、クラウド側の配信制御装置が一括して配信制御を実施する。配信制御装置は、全ての移動体から配信制御に必要な制御情報を取得する。従って、基地局数を N 、基地局配下の移動体数を M とすると、バックホール、基地局の制御メッセージ数のオーダーは、 $O(MN)$ 、 $O(M)$ となる。

移動体は、配信制御装置へ制御に必要な自身の情報を定期的に送信するため、制御メッセージ数のオーダーは $O(1)$ である。

付録 A.3 MEC の制御メッセージ数のオーダー

MEC では、配信制御をエッジ(基地局あるいはその近傍のノード)が実施する。配信制御に移動体の情報を必要とする場合、エッジでの制御メッセージ数のオーダーは、エッジ配下の移動体数を M とすると、 $O(M)$ である。

一方、エッジ配下の各移動体は、エッジへ制御に必要な自身の情報を定期的に送信するため、制御メッセージ数のオーダーは $O(1)$ である。

配信制御において、エッジとコンテンツサーバ間の連携を必要としない場合、バックホールを通過する制御メッセージ数は 0 である。

付録 A.4 SDN の制御メッセージ数のオーダー

SDN では、クラウド側の SDN コントローラがネットワーク上の SDN 対応スイッチに制御ルールを通知し、ルーティングは SDN 対応スイッチ上の制御ルールをまとめたフローテーブルに従い実施される。SDN 対応スイッチは、パケット転送時にフローテーブルに該当する制御ルールが存在しない場合、SDN コントローラに制御ルールの送信を依頼する。

従って、SDN 対応スイッチごとのフローテーブルに制御ルールが存在しない確率を表す確率変数を $q(0 \leq q \leq 1)$ 、SDN 対応スイッチ数を $S(S \gg M)$ とすると、SDN コントローラとの通信のために、バックホールを通過する制御メッセージ数のオーダーは、 $O(qS)$ となる。

この時、移動体は制御メッセージを SDN コントローラへ送信する必要がないため、制御メッセージ数は 0 となる。