

ユーザ参加型センシングに基づく 動画渋滞情報の効率よい収集および配信方式

玉井 森彦¹ 安本 慶一¹ 福倉 寿信² 岩井 明史²

概要: 既存の交通情報システムでは、テキストや図形を用いた渋滞状況の提示が一般的である。しかし、既存システムでは、渋滞度合いを数段階でしか区別できず、ドライバが、これらの情報から、実環境で生じる多様な渋滞度合いを正しく把握することは難しい。本稿では、ドライバに対し、より直接的な渋滞状況の把握を促すため、スマートフォンを用いたユーザ参加型センシングにより、渋滞地点の状況を動画で撮影し、それを収集、配信するためのシステムを提案する。動画データの送受信により 3G 回線の帯域を大きく消費するため、帯域制約を考慮したうえで、ドライバに対し可能な限り適切な動画を配信する必要がある。そこで、動画が示す渋滞度合いと、現時点での渋滞度合いとの差異、もしくは動画の視聴要求送信から、動画が受信されるまでの経過時間などをもとに、ドライバが渋滞動画を見た際のメリットを効用関数として定義する。そして、帯域制約のもとで、効用関数値の最大化を行うことで、各車両に対し効率よく動画の収集と配信を行うためのアルゴリズムを提案する。シミュレーションによる実験より、提案アルゴリズムは、単純なアルゴリズムに比べ、効用関数値の総和を約 10%改善できることを確認した。

Efficient Collection and Delivery of Video Data for Traffic Congestion Surveillance on Roads Using Vehicular Participatory Sensing

MORIIHIKO TAMAI¹ KEIICHI YASUMOTO¹ TOSHINOBU FUKUKURA² AKIHITO IWAI²

Abstract: Existing Traffic Information Systems commonly provide traffic information of roads by means of simple texts or computer graphics. In these systems, since the variety of congestion conditions in real environments are represented using limited number of congestion levels, it is difficult for drivers to understand the actual traffic condition from such limited information. In this paper, to provide more direct information about traffic conditions for drivers, we propose a system for collection and delivery of video data on congested roads based on vehicular participatory sensing using smartphones. A large amount of bandwidth is consumed by sending and receiving video data over 3G networks, the system needs to deliver the most appropriate video data to the drivers by considering the constraints on 3G bandwidth. We define an utility function that models driver's benefit of viewing congestion videos from the difference in congestion degree between the delivered video and the current traffic condition, from the difference in time between a transmission of video request and a receipt of video data, etc. To achieve efficient collection and delivery of congestion videos, we propose an algorithm for maximizing the value of the utility function subject to the constraints on 3G bandwidth. From the simulation result, we confirmed that the proposed algorithm achieves about 10 % higher value of the sum of the utility function than that of a simple algorithm.

1. はじめに

交通渋滞は、時間的、エネルギー的損失に加え、排気ガスによる環境や健康への悪影響など、多様な問題を引き起こしている。交通渋滞を緩和するための方法として、日本にお

¹ 奈良先端科学技術大学院大学
Nara Institute of Science and Technology
² 株式会社デンソー
DENSO CORPORATION

いては、VICS (Vehicle Information and Communication System) [1] が普及している。VICS では、中央のセンターが収集した道路交通情報を、FM 多重放送や道路沿いに設置されているビーコン発信局から放送し、それを受信した車両は、渋滞の発生地点を VICS 対応カーナビゲーションなどの車載端末上に文字や図形等で表示する。

VICS は対応カーナビの急速な普及により、現在多くのユーザに利用されるに至っているが、提供される渋滞情報は限定的である。VICS によって提供される渋滞情報の表示方法として一般的なのは、混雑度合いに応じて三段階に色分け (赤, 黄, 緑など) された矢印型の図形が、地図上の渋滞の発生区間に表示されるというものである。しかし、これらの情報からドライバーは、渋滞区間における実際の渋滞の程度を推測で判断するしかなく、その渋滞をなんとかしてでも回避すべきか、または許容範囲であるかを判定するために十分な情報が与えられているとは言い難い。実質的な渋滞の深刻度合いは、渋滞の発生地点における道路の特性や、その周辺の施設 (例えば、大型の商業施設など) の有無によって様々に変化するため、三段階程度の混雑度合いでは、そのような多様な渋滞状況の違いを表現することは困難である。

本研究では、ドライバーに対してより直感的な渋滞状況の把握を促すために、渋滞発生地点で撮影した動画による渋滞情報の配信を実現するシステムを提案する。渋滞発生地点の状況を動画で見ることにより、VICS で提供される間接的な渋滞情報に比べ、道路の幅や形状、周囲の地形や建物、車間距離、走行状態などの、文字や図形のみでは伝えにくく、かつ、動画で見れば容易に把握できる情報を、直接的に提供することが可能となる。

同様の観点で、画像による渋滞情報が取得可能なサービスとして、2011 年から国土交通省により ITS スポット [2] が開始されている。ITS スポットでは、VICS 同様、対応カーナビにより、専用の路側機から発信される情報を受信することでサービスを受ける仕組みとなっている。路側機の設置が必要なことから、現状では主に高速道路上でのみサービスが利用可能であり、一般道も含めた広範囲でのサービスの提供は膨大なコストを要するため困難であるという問題がある。広範囲かつ低コストでのサービスの実現のためには、路側への専用設備の設置が必要なく、ユーザ数の増加に対し、自動的にサービス規模を拡大できるような仕組みを有することが望ましい。

このような観点から、本研究では、近年普及が進むスマートフォンに注目する。スマートフォンは、GPS による位置測定、3G 回線によるデータ通信、カメラによる動画の撮影、ディスプレイ上での動画の再生と UI の表示が可能であり、動画による渋滞情報の収集、および配信のためのセンサと表示端末としての十分な機能を備えている。車内に設置されたスマートフォンを用いることで、路側への

追加のインフラの設置がなくとも、自然にサービス規模を拡大することができる。

しかしながら、動画の送受信には多くの通信帯域を消費するため、サービスの展開にあたっては、3G 回線へ与える負荷の大きさについて十分に配慮する必要がある。本研究では、3G 回線の利用可能帯域を制約として考慮したうえで、ユーザに対して可能な限り正確な渋滞状況を配信するための方式を提案する。提案方式では、(1) 渋滞動画の撮影時刻と視聴時刻との差、(2) 動画視聴要求を送信してから視聴可能になるまでに要した遅延時間、(3) 視聴した動画の渋滞の程度とリアルタイムの渋滞の程度とのずれの大きさ、に基づきドライバーが渋滞動画を見た際のメリットを効用関数として定義する。そして、3G 回線の帯域制約のもとで、効用関数値を最大化できるような車両を選択することで、効率のよい渋滞動画の収集と配信を実現する。

2. 動画による渋滞情報配信システム

安全で快適なドライビングの実現のため、ドライバーの運転を支援するための交通情報の提供を目的とした、様々なサービスが提案されている。それらのサービスを分類すると、(1) 渋滞情報の配信 (渋滞程度、通過時間などの快適性に関わる情報)、(2) 道路状況の配信 (事故、路面状況など、安全に関わる情報)、(3) 口コミ情報の交換 (安全、快適を含む様々な情報) などがある。また、これらサービスの提供方法は、(i) インフラ型、(ii) ユーザ参加型に分類できる。

2.1 インフラ型のサービス

上記 (1) の渋滞情報に関する代表的なサービスは VICS [1] であり、テキスト、図形、カーナビ上での地図表示などで渋滞状況を知らせる。しかし、渋滞の度合を数段階でしか区別しないため、実際に発生する多様な渋滞の度合を、この情報からドライバーが正確に把握するのは難しい。一方、ITS スポット [2] は、(1) の渋滞情報に加え、(2) の道路状況を写真とテキストによる詳細情報として提供するサービスである。このサービスでは、図 1 に示すように、気象急変時の路面状況や渋滞ポイント手前の交通状況をカーナビ画面に表示できるため、運転者は現場の状況をより直感的に把握できる。

近年、上記 (1)、(2) を対象として、スマートフォンや携帯電話を利用したサービスも提供され始めた。日本道路交通情報センター (JARTIC) の交通情報を閲覧可能なスマートフォン向けウェブサイト ATIS [3] や、主要道路の交通状況を閲覧可能な Yahoo! ロコ [4] などがある。道路の混雑状況を記録した動画を携帯電話に配信する、ライブ映像情報 Watcha と呼ばれる有料サービス [5] も存在する。

しかし、上記で述べたサービスは、いずれも道路上に設置されたセンサやカメラ、路側機など整備されたインフラ

提供箇所	提供タイミング	提供項目	表示イメージ
気象急変 箇所手前	常時/ 事象発生時	気象情報 道路状況: 降雪量、雨量 路面状況: 凍結、湿潤、冠水、 積雪	 <small>動止画+文字+音声 降雪状況の例</small>
渋滞ポイント 手前	常時/ 事象発生時	交通状況 渋滞情報: 渋滞位置、渋滞長、 走行速度	 <small>動止画+文字+音声 渋滞状況の例</small>

図1 ITS スポットが配信する情報
 (http://www.mlit.go.jp/road/ITS/j-html/spot_dsrc/naiyou.html より引用)

のダッシュボードへ固定されているものとする。任意の参加者は、そのスマートフォンで記録した走行中の動画をクラウドへアップロードすることによって、その動画を必要とする他の参加者が利用できるようにする。



図2 スマートフォンの車両への搭載

の使用を前提としており、サービス対象は主要道路に限られているといった問題がある。

2.2 ユーザ参加型のサービス

近年、Participatory Sensing (ユーザ参加型センシング) [6], [7] に基づき、参加者が取得した情報をクラウドに収集し、他の参加者にフィードバックするサービスが急増している。上記 (1) 渋滞情報に関して、会員の走行データから道路交通情報 (プローブ交通情報) を生成し、それをもとに地図に存在しない新規道路をカーナビに表示したり、渋滞回避経路の案内を行うサービス (Internavi [8], G-BOOK [9], CARWINGS [10], Smart Loop [11] など) が各社から提供されている。また、上記 (3) 口コミ情報交換に関して、ケンモ [12] では、登録会員による交通情報に関する口コミ情報 (渋滞、事故など) の登録、閲覧ができるサービスを提供している。しかし、現状ではテキスト情報のみに限定されている。

これら既存のユーザ参加型サービスでは、主要道路に限定されず、会員数の増加に伴って、より広域かつ詳細なサービスが利用可能になることが期待できる。しかし、収集される情報は車両の走行データ (時系列の位置情報) や場所情報を含むテキストデータのみであり、ドライバーに対して写真や動画などによる直感的な情報提示を行うには至っていない。

以上のように、インフラ型のサービスではサービス対象が狭くなり、ユーザ参加型のサービスでは写真や動画を用いた直感的なサービスの提供が困難であるという問題がある。本研究では、ユーザ参加型のサービスで、かつ、動画による渋滞状況の配信を目的とする。

2.3 提案システム

2.3.1 動画の収集方法

提案システムでは、カメラ搭載スマートフォンを用いて、渋滞中の走行状況を取得することを想定する。図2に示すように、スマートフォンは、クレードルなどを用いて車両

テキストベースの渋滞情報や写真データと比べ、動画データはサイズが大きいため、全車両が動画を常に記録しクラウドへアップロードしようとする、3G回線に多大な負荷を与えてしまう。そこで、3.1節で述べるように、本システムでは、使用する3G通信の利用可能帯域をあらかじめ決めておき、動画のアップロードを、その帯域の範囲内で、かつその時に情報が必要とされている道路について優先的に行うようにする。より具体的には、参加者が定期的にアップロードする位置情報をもとに渋滞区間を認識し、渋滞の程度の時間変化が大きい地点で撮影された動画について、より優先的にクラウドへアップロードするようにする。

動画の撮影やアップロードにより、スマートフォンのバッテリー等のリソースが相当量消費されるため、動画を撮影しアップロードすることに関しては、なんらかのインセンティブが必要である。本研究では、情報の提供と消費を相互交換するためのポイントを導入する。動画をアップロードすることでポイントが加算され、動画のダウンロードによりポイントが減算される。これにより、情報提供者のインセンティブを確保する。

2.3.2 動画の配信方法

動画の表示端末として、カーナビの専用端末やスマートフォンを想定し、いずれを利用する場合でも、カーナビ (スマートフォンの場合はカーナビソフト) との連動による動画の提示を想定する。渋滞動画は、渋滞区間に入るより前、すなわち、迂回経路を選択可能な間に提供すべきである。ドライバーが渋滞動画を閲覧しようとする時、目的地への経路がカーナビに設定されている場合とそうでない場合が考えられる。案内経路が設定されている場合には、カーナビの地図画面上の案内経路に沿って、動画が利用可能な場所にアイコンを表示する。また、経路が設定されていない場合には、自車周辺 (自車の向かう方向で数kmの範囲) で動画が利用可能な場所にアイコンを表示する。ドライバーが動画を見たい場所のアイコンをクリックすると動画を表示する。例えば、図3に示すように、地図上で吹き出しを表

示し、その中で動画を再生する。



図 3 ナビ画面への渋滞動画の表示

3. 帯域制約を考慮した動画の収集と配信

提案方式の目的は、動画による渋滞情報の受信を要求する車両に対し、できるだけ遅延が少なく、かつ渋滞地点の渋滞状況を正確に反映した動画を配信することである。理想的には、各渋滞情報の受信要求車両に対し、各々が要求する渋滞地点の動画を、要求後即座にクラウドへアップロードし、また、その動画を受信要求車両へ即座に配信することができれば、ドライバーは渋滞地点におけるほぼリアルタイムの渋滞状況を把握することができる。しかし、動画の送受信には多くの通信帯域を消費し、また、スマートフォンが利用可能な 3G 回線の帯域は限られているため、このような即座の渋滞動画の配信を全車両に対して実現することは難しい。そこで本研究では、3G 回線の帯域制約を考慮したうえで、可能な限り低遅延で、かつ、渋滞地点の状況を正確に反映した動画を配信するための方式を提案する。

以下では、まず提案方式が対象とする問題設定について述べ、次にそれを解決するためのアルゴリズムについて述べる。

3.1 問題設定

3.1.1 道路網と車両モデル

道路網を、道路セグメントの集合によって表現する。各道路セグメントは、道路上の任意の位置で分割された道路の一部であり、典型的には、交差点やカーブの直前などの位置を端点として分割される。道路セグメントの集合を E 、各道路セグメントの端点の集合を V とし、道路網をグラフ $G = (V, E)$ で表現する。

全車両の集合を U とする。各車両は、スマートフォンが取得する GPS 情報により、自身の現在位置を定期的にクラウドへ送信するものとする。提案システムでは、時間経過を離散的に管理するものとし、単位時間間隔を t_u としたとき、タイムスロットの列 $t_i (i = 0, 1, 2, \dots)$ を考える。ここで、 $t_i = \{t \mid t_u \times i \leq t < t_u \times (i + 1)\}$ である。タイムスロット t_i 内のいずれかの時刻で、車両 $u \in U$ の送信した GPS 情報がクラウドによって受信されたとする。クラウドでは、その GPS 座標にもっとも近い道路セグメント

が $e \in E$ であるとする、車両 u がタイムスロット t_i において走行中の道路セグメントを e と推定することができる。これにより、各タイムスロット t_i において、各道路セグメント e に対し、 e を走行中の車両の集合 $U_e(t_i)$ を求めることができる。

各車両は、クラウドに対し、自身がこれから向かう方面に発生中の渋滞に関して、渋滞動画の視聴要求を送信する。渋滞動画は、道路セグメント単位で撮影され、各車両は、どの道路セグメントの渋滞動画を視聴したいかを指定するものとする。渋滞の検出に関しては、例えば、各道路セグメントを通行する全車両における速度の平均値が、ある閾値を下回るかどうかを判定するという方法が考えられる。また、信号による速度低下などを区別し、より高精度に渋滞を検出したい場合は、文献 [13] の方法などが利用できる。各タイムスロット t_i において、道路セグメント e の渋滞状況を要求する車両の集合を、 $R_e(t_i)$ と表記する。各道路セグメントの渋滞動画のアップロード、またはダウンロードによって消費される帯域 (bps) を、 W と表記する。なお、1 つの渋滞動画のアップロードまたはダウンロードに要する時間は、高々 1 タイムスロット t_u とする。すなわち、渋滞動画 1 つの容量 (bit) を L としたとき、渋滞動画 1 つをアップロード、またはダウンロードするのに要する時間 (sec) は、 $L/W \leq t_u$ とする。

3.1.2 3G 回線モデル

システムが対象とするエリア内に存在する全ての 3G 基地局に対し、各 3G 基地局の通信可能範囲 (3G エリア) が既知であるとする。3G エリアの集合を A と表記する。各 3G エリア $a \in A$ に対し、3G エリア内の全ての道路セグメントの集合を E_a と表記する。各タイムスロット t_i において、3G エリア a 内の全車両の集合を $C_a(t_i)$ と表記する。 $C_a(t_i)$ は、 $C_a(t_i) = \bigcup_{e \in E_a} U_e(t_i)$ より求めることができる。各 3G エリア a に対し、 a をカバーする基地局の利用可能帯域を考える。一般に、3G 基地局がサポートする無線通信方式 (例えば、HSPA (High Speed Packet Access) など) の上り方向と下り方向の通信速度は非対称であるため、上り方向と下り方向の利用可能帯域 (bps) を個別に考え、それぞれ、 B_a^{up} 、 B_a^{down} と表記する。

以上で述べた表記に関して、その具体例を図 4 に示す。

3.1.3 ドライバの効用モデル

3G エリアの帯域制約により、渋滞動画を要求した全ての車両が、要求対象の道路セグメントにおける渋滞状況をリアルタイムに反映した動画を受信することは難しい。従って、一般的には、車両が受信する渋滞動画は、実際にそれが撮影された時刻から、一定の遅延を伴って受信されることになる。

ここで、遅延を伴って受信された動画が、ドライバーにとってどのような場合に不都合であるかについて考える。まず、(1) 撮影が行われた時刻と、それを視聴する時刻との

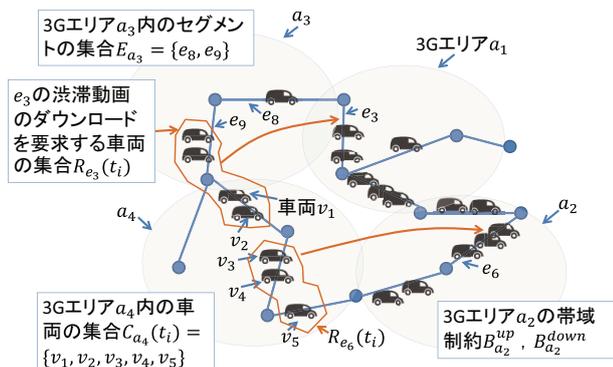


図 4 道路網の例

違いが大きいほど不都合であると考えられる．例えば，撮影が行われた時間が夕刻であったとし，それを視聴した時刻が日没の後であったとすると，本来ならばもっと暗いはずが，実際よりも明るい時間帯の動画を視聴することになるため，ドライバーが違和感を感じる可能性がある．また，(2) 動画を要求してから，実際に動画を受信するまでの時間が長くなるほど不都合であると考えられる．例えば，渋滞地点の動画を見て，その渋滞地点を通るかどうかを判断しようとした場合，動画の受信が遅くなると，その渋滞地点の近くまで接近してしまい，渋滞地点を回避することが出来なくなってしまう可能性がある．なお，(1) で述べた「動画の撮影時刻」と，(2) で述べた「動画の要求時刻」とは，一般には異なる時刻となるため，(1) と (2) を別々に考える必要がある．例えば，車両 u_1 がタイムスロット t_i において道路セグメント e の動画を要求し，それに対応するため，同じくタイムスロット t_i において e の動画が撮影されたとする．この場合，動画の撮影時刻と要求時刻はともに t_i で一致するが，その後，タイムスロット t_j において別の車両 u_2 が e の動画を要求し， u_2 に対して， u_1 のときに撮影された動画を配信した場合，動画の撮影時刻 t_i と要求時刻 t_j は異なる値となる．

さらに，(3) 撮影が行われた時刻での渋滞の度合いと，それを視聴した時刻における，実際の渋滞の度合いとが異なることも不都合であると考えられる．例えば，撮影が行われた時刻での渋滞度合いが非常にひどい場合でも，それを視聴した時刻には，既に渋滞が解消している場合，動画を見たドライバーは渋滞の度合いが実際よりもひどい状態である，と誤って判断してしまう．なお，ここでは，(1) で述べたような，時間の経過による不都合とは無関係に，渋滞の度合い自体が，実際の渋滞度合いとは異なることによる不都合について述べている．従って，例えば動画の撮影時刻が視聴時刻よりもはるか以前であったとしても，撮影時刻での渋滞度合いが，視聴時における実際の渋滞度合いとほぼ同等であるならば，ここで述べた不都合は生じないものとする．これは，渋滞動画を見るドライバーにとって，渋滞の程度さえ同等であれば，それが過去のいつに撮影され

たものであろうと，リアルタイムの渋滞動画を見た場合と同等の情報を得られるだろうという考えに基づく．

以上の考察をもとに，遅延を伴って配信される動画を視聴することでドライバーが受ける効用について検討する．まず，上記 (1) を考慮するため，動画の撮影時刻と視聴時刻との差を τ とし， $\tau = 0$ のとき $f(\tau) = 1$ ，かつ， τ が大きくなるにつれ， $f(\tau)$ が減少するような関数 $f(\tau) \geq 0$ を考える．このような関数は様々考えられるが，例えば， τ の最大値を τ_{max} とし， $f(\tau) = 1 - \tau/\tau_{max}$ を用いることができる．上記 (2) についても，(1) と同様に考えることができる．すなわち，動画の要求時刻と視聴時刻との差を λ とし， $\lambda = 0$ のとき $g(\lambda) = 1$ ，かつ， λ が大きくなるにつれ， $g(\lambda)$ が減少するような関数 $g(\lambda) \geq 0$ を考える．また，上記 (3) を考慮するため，動画の撮影時刻での渋滞度合いと，動画の視聴時刻における実際の渋滞度合いとの差を δ とし， $\delta = 0$ のとき $h(\delta) = 1$ ，かつ， δ が大きくなるにつれ， $h(\delta)$ が減少するような関数 $h(\delta) \geq 0$ を考える．ここで， δ を計算するためには，渋滞度合いを定量化する必要がある．これは，例えば，渋滞地点の道路セグメントを走行する車両の集合に対し，それらの車両の平均速度を求めることにより定量化することができる．以上の検討をもとに，ドライバーの効用関数 $S(\tau, \lambda, \delta)$ を，

$$S(\tau, \lambda, \delta) = f(\tau) \cdot g(\lambda) \cdot h(\delta) \quad (1)$$

と定式化することができる．この効用関数は，0 以上 1 以下の値をとり，値が大きいほど，ドライバーが適切な動画を視聴できたことを意味する．

3.1.4 最適化問題

以上に基づき，提案方式が対象とする最適化問題を定式化する．

タイムスロット t_i において，道路セグメント e の渋滞動画がクラウドへアップロードされたか否かを表す関数を $u_e(t_i)$ とする． $u_e(t_i)$ は，渋滞動画がアップロードされた場合に 1 で，さもなければ 0 となる．同様に，タイムスロット t_i において，道路セグメント e の渋滞動画が車両 $u \in U$ によってダウンロードされたか否かを表す関数を $d_{e,u}(t_i)$ とする． $d_{e,u}(t_i)$ は，渋滞動画がダウンロードされた場合に 1 で，さもなければ 0 となる．

タイムスロット t_i において，各 3G エリア $a \in A$ で消費される上り帯域 $L_a^{up}(t_i)$ ，および，下り帯域 $L_a^{down}(t_i)$ はそれぞれ次のように計算できる：

$$L_a^{up}(t_i) = \sum_{e \in E_a} W \cdot u_e(t_i), \quad (2)$$

$$L_a^{down}(t_i) = \sum_{e \in E} \sum_{u \in C_a(t_i) \cap R_e(t_i)} W \cdot d_{e,u}(t_i). \quad (3)$$

タイムスロット t_i において，車両 u に乗車するドライバーが道路セグメント e の渋滞動画を見た場合の，式 (1) に基づく効用関数の値を $S_{e,u}(t_i)$ と表記する．各タイムスロ

ト t_i において、各 3G エリアの上りと下りの帯域制約を満たしつつ、全タイムスロットに渡って、ドライバの効用関数の値の全車両に対する総和を最大化することが提案方式の目的である：

$$\text{maximize } \sum_i \sum_{e \in E} \sum_{u \in R_e(t_i)} S_{e,u}(t_i) \cdot d_{e,u}(t_i) \quad (4)$$

$$\text{subject to } L_a^{up}(t_i) \leq B_a^{up}, \quad \forall i, \forall a \in A \quad (5)$$

$$L_a^{down}(t_i) \leq B_a^{down}, \quad \forall i, \forall a \in A. \quad (6)$$

なお、以上で定義した問題では、対象とする時間の範囲を、全タイムスロットに渡って考慮するものとしたが、実際には、タイムスロット t_i において、 t_i より未来のタイムスロットにおける車両の位置や渋滞動画の要求の発生状況などを正確に知ることはできない。そのため、実用上は、タイムスロット t_i において、それ以降の数タイムスロット先 ($t_j (i \leq j)$ とする) までの状況を統計的手法などを用いて予測 [14] し、それをもとに、 $j - i + 1$ 個分のタイムスロットで上記の最適化問題を解くことを繰り返す、という手法をとることが考えられる。ただし本稿では、このような予測に基づく複数タイムスロット分の範囲で最適化問題を解くことについては今後の課題とし、以降では、各タイムスロット毎に独立したものとし、各々のタイムスロット毎に上記の最適化問題を個別に解く (すなわち $i = j$)、という場合について考えるものとする。

3.2 アルゴリズム

提案アルゴリズムの目的は、タイムスロット t_i において、制約 (式 (5), (6)) のもとで、目的関数 (式 (4)) を最大化するような、 $u_e(t_i)$ と $d_{e,u}(t_i)$ に対する 0 か 1 の割り当てを見つけることである。

アルゴリズムの設計にあたって、次の点を考慮する。アップロードに関しては、各 3G エリア $a \in A$ において、どの道路セグメント $e \in E_a$ の動画を優先的にアップロードするかについて、選択の余地がある。3.1.3 項で述べたように、過去のタイムスロットにおいてアップロードされた動画における渋滞の程度が、現在の実際の渋滞の程度と同程度であれば、現在のタイムスロットにおいて、あえて動画をアップロードする必要性は少ない。従って、 a 内の各道路セグメント e において、 e の動画を要求している全ての車両が動画をダウンロードできるものと仮定したうえで、過去にアップロードされた動画をダウンロードする場合の効用の総和と、新たにアップロードされた動画をダウンロードする場合の効用の総和との差分を計算し、その差分が大きい道路セグメントから優先的に動画のアップロードを行うものとする。

次に、ダウンロードに関しては、各 3G エリア $a \in A$ において、 a 内の道路セグメントを通る各車両 $u \in C_a(t_i)$ と、 $u \in R_e(t_i)$ を満たす道路セグメント e との各組 (u, e) に対

し、どの組 (u, e) が優先的に動画をダウンロード (すなわち、 u が e の動画をダウンロード) するかについて、選択の余地がある。これに関しては、単純に、効用の値が大きいものから順にダウンロードを行うものとする。

4. 評価

提案アルゴリズムを用いることで、全車両における効用の値の総和が、単純なアルゴリズムに比べてどの程度向上できるかについて、計算機シミュレーションによる評価を行った。以下では、その評価方法と結果について述べる。

車両の動きについて、シミュレーションでは、セルオートマトン [15] によるモデルを利用した。図 5 に示すように、セル空間は、グリッド幅 N とブロック幅 M の 2 つのパラメータに基づき構成される。図 5 は、 $N = 4, M = 5$ の場合のセル空間の例である。例では、ブロック幅に基づき、 5×5 のセル行列が構成され、さらに、グリッド幅に基づき、 4×4 個のセル行列が構成されている。一つのセル行列に対し、真ん中の $M - 1 \times M - 1$ のセル行列と、4 隅のセル (交差点セルとよぶ) を除いた部分のセル (図では、色のついたセル) が、車両の存在できるセル (車両セルとよぶ) である。縦方向、もしくは横方向の車両セルの連なりは、それぞれ 1 つの道路セグメントを構成する。各車両セルには、最大 2 台の車両が存在でき、それぞれは、互いに逆向きの進行方向を持つ。図 5 の例では、縦方向の道路セグメント内の 3 つの車両セルのそれぞれにおいて、上方向と下方向の進行方向があることが図示されている。各進行方向において、各セルにつき車両が最大 1 つまで存在できる。また、各車両は、次のタイムスロットにおいて、自身の進行方向のセルが空いている場合に限り、前進することができる。例えば、図 5 の例では、車両 c_1 は次のタイムスロットにおいて必ず前進できるが、車両 c_4 は、その前の車両が先に移動した場合に限り、前進できる。なお、各タイムスロットにおいて、どの車両から先に移動させるかについては、そのタイムスロットでまだ移動を行っていない車両の中から一台をランダムに選択する、という操作を繰り返すことで決定する。各車両は、次の進行先が交差点セルの場合、次のタイムスロットにおいて、交差点に隣接する道路セグメントの中で、現在自身が属す道路セグメント以外の任意の道路セグメントを一様乱数で選択し、その道路セグメントの車両セルに進行する。

各 3G エリアは、グリッド全体を等分割する単位で設置する。例えば、図 5 の 4×4 のグリッドに対し、 2×2 のグリッド単位で各 3G エリアを設置する。各 3G エリア内に属す道路セグメントは、同一基地局に対する帯域制約を共有する。3G エリアの境界に属す道路セグメントについては、2 つの 3G エリアに同時に属すため、それぞれのエリアの帯域を、それぞれの制約の範囲内で利用可能とする。

比較対象として、次の単純なアルゴリズムを用いた：3.2

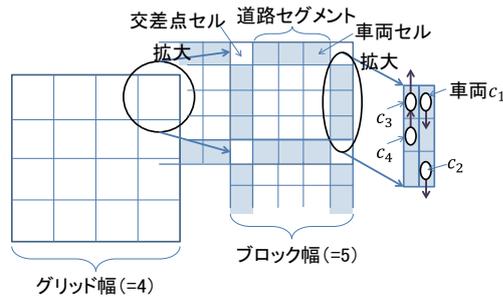


図 5 セル空間の例

節のアルゴリズムにおいて、各 3G エリア $a \in A$ 内のどの道路セグメント $e \in E_a$ の動画を優先的にアップロードするかについての判定の際に、常に最新の動画をダウンロードするものとして、 e の動画を要求している全ての車両での効用の総和が大きい道路セグメントから優先的に動画のアップロードを行う。

実験における各種パラメータは次のように設定した：ブロック幅を 35，グリッド幅を 15 とする．3G エリア数を 9 とする．総車両数を 3000 とする．各車両は、各タイムスロットにおいて、0.01 の確率で渋滞動画の要求を行う．このとき、要求先の道路セグメントは、全道路セグメントの集合から一様乱数に基づき一つを選択して決定する．効用関数は、 $f(\tau)$ 、 $g(\lambda)$ 、 $h(\delta)$ のいずれについても、1 から線形に減少する関数 $f(x) = 1 - x/x_{max}$ の形をとり、 $\tau_{max} = 1000$ 、 $\lambda_{max} = 100$ 、 $\delta_{max} = 0.1$ とする．各 3G エリアの利用可能帯域制約は、上りについては、1 タイムスロットあたり 1 つの動画のアップロードまで可能、また、下りについては、1 タイムスロットあたり 5 つの動画のダウンロードまで可能とした．シミュレーションは、10000 タイムスロット間行った．

実験結果を図 6 に示す．図では、見やすさのため、2500 番目から 3500 番目までのタイムスロット間での結果を示している．図より、提案アルゴリズムは、単純アルゴリズムに比較し、全般的に高い効用関数値の総和を達成できることが確認できる（特に、効用関数値の総和が 35 以上のものの数に注目すると分かりやすい）．10000 タイムスロット分の効用関数値の総和の平均値を求めると、提案アルゴリズムが 28.4，単純アルゴリズムが 25.6 であった．これにより、提案アルゴリズムは、単純アルゴリズムに比べ、効用関数値の総和を約 10%改善できることが分かった．

5. 関連研究

文献 [13], [16], [17], [18], [19] において、スマートフォンなどの携帯端末を利用した、ユーザ参加型センシングに基づく交通情報の収集とその利用のための方式が提案されている．以下では、その中から特に本研究と関連の強いもの 2 点について述べる．

ユーザ参加型センシングによる交通情報の収集と配信の

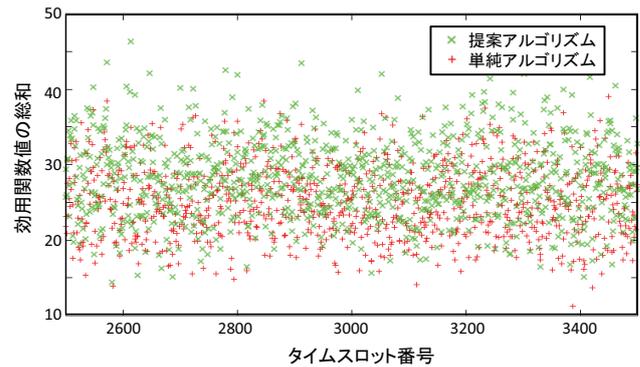


図 6 効用関数値の総和

実現を容易化するため、文献 [16] では、CarTel と呼ばれるミドルウェアが提案されている．CarTel は、主に、ICEDB と呼ばれるセンシング情報の蓄積のためのデータベースと、各車両と中央サーバ間の断続的な通信をサポートするための CafNet と呼ばれる DTN (Delay Tolerant Network) 用のネットワークスタックから構成される．ICEDB は、中央サーバ上の主データベースである ICEDB サーバと、各車両上に配置される副データベースである ICEDB リモートにより構成される．車両と中央サーバ間は、帯域に制約があり、かつ、断続的な通信断が発生する無線通信網により接続されることを想定するため、各車両のセンシング情報は、一度各車両の ICEDB リモートに保持され、中央サーバとの通信が可能になったタイミングで、できるだけ効率的に ICEDB サーバへ送信される．このため、ICEDB では、通常の SQL 文を拡張し、センシング情報を各種の優先度付きのフィルタリング処理を施した上で、重要度の高いものから優先的に ICEDB サーバへ送信できるようにしている．

文献 [13] では、3G 回線を利用し、各車両からの定期的に GPS 情報の収集を行うことで、各道路セグメント上で発生する渋滞を高精度に検知する方式が提案されている．渋滞の検知に関して、単純な方法では、各車両から集めた GPS 情報から、各道路セグメント上での車両の平均速度を求め、平均速度が特定の閾値を下回る場合、渋滞発生とみなすことができる．しかし、平均速度の低下は赤信号による停止を原因とする場合もあるため、赤信号による停止と、真の渋滞とを区別する必要がある．そのため、文献 [13] の方式では、時間的な平均速度に加え、空間的な平均速度（すなわち、道路セグメントを一定区間に分割し、各区間ごとの速度を、全ての区間に対して平均化した値）を利用する．赤信号による停止は、特定の区間における速度を低下させるだけであり、その他の多くの区間において通常で走行できている場合、空間的な平均速度は、非渋滞時の走行速度から大きく低下することはない．一方、渋滞の発生時には、道路セグメント上の多数の区間で停車と発進を繰り返すため、空間的な平均速度は、通常の走行速度に対し

大きく低下する。これにより、渋滞による速度低下と信号による速度低下とを区別し、高精度に渋滞を検知している。

これら既存研究では、車両から収集、配信する情報として、主にGPS情報などデータ量の小さいものを想定しており、本研究のように、データ量の大きい動画を対象としたものではない。動画の送受信を伴うシステムを実現するためには、本稿で述べたような、3G回線の帯域制約を満たしたうえで、いかにドライバにとって適切な情報を配信するかについて考慮した方式が求められる。我々は、既に文献[20]において、帯域制約を考慮した渋滞動画の収集、配信方式を提案したが、本稿では新たに、文献[20]で不十分であったシミュレーションによる評価を行い、その結果より提案アルゴリズムの有効性を示した。

6. おわりに

本稿では、渋滞情報の配信に関して、VICSなど従来型のテキストや図形による提示ではなく、渋滞現場を走行する車両により撮影された動画の配信を実現するシステムを提案した。動画データの送受信には多くの帯域を必要とするため、3G回線の帯域制約を考慮したうえで、可能な限りリアルタイムの渋滞度合いに近い品質の動画を効率よく収集、配信する方式を提案した。提案方式では、ある渋滞地点で撮影された動画が、必ずしもリアルタイムに撮影されたものではない場合でも、最新の渋滞の状況と同程度の渋滞状況を表している場合、ドライバにとって、現場の渋滞状況の把握のために十分な情報を備えていることに着目し、そのような場合には渋滞動画の頻繁な更新を抑えることで、3G回線の消費帯域を抑える。

シミュレーションによる評価実験により、単純なアルゴリズムに比べ、提案アルゴリズムは、効用関数値の全車両あたりの総和を約10%改善できることを確認した。

参考文献

- [1] VICS, <http://www.vics.or.jp/>.
- [2] ITS Spot, http://www.mlit.go.jp/road/ITS/j-html/spot_dsrc/.
- [3] ATIS 交通情報サービス, <http://www.atis.co.jp/>.
- [4] Yahoo!ロコ, <http://loco.yahoo.co.jp/>.
- [5] ライブ映像情報 Watcha, <http://m-tv.jp/person/watcha/>.
- [6] J. Burke, D. Estrin, M. Hansen, A. Parker, N. Ramanathan, S. Reddy, and M. Srivastava: "Participatory Sensing," In *Proc. of World Sensor Web Workshop*, 2006.
- [7] S. Mathur, T. Jin, N. Kasturirangan, J. Chandrashekhara, W. Xue, M. Gruteser, and W. Trappe: "ParkNet: Drive-by Sensing of Road-Side Parking Statistics," In *Proc. of MobiSys'10*, pp. 123–136, 2010.

- [8] Honda インターナビ, <http://www.honda.co.jp/internavi/>.
- [9] G-BOOK, <http://g-book.com/>.
- [10] 日産カーウイングス, <http://drive.nissan-carwings.com/WEB/>.
- [11] スマートループ, <https://www.smartloop.jp/>.
- [12] ケンモ, <http://www.kmmo.jp/>.
- [13] J. Yoon, B. Noble, and M. Liu: "Surface Street Traffic Estimation," In *Proc. of MobiSys'07*, pp. 220–232, 2007.
- [14] C. de Fabritiis, R. Ragona, and G. Valenti: "Traffic Estimation And Prediction Based On Real Time Floating Car Data," In *Proc. of ITSC'08*, pp.197–203, 2008.
- [15] S. Wolfram: "Theory and Applications of Cellular Automata," *World Scientific*, 1986.
- [16] B. Hull, V. Bychkovsky, Y. Zhang, K. Chen, M. Goraczko, A. Miu, E. Shih, H. Balakrishnan, and S. Madden: "CarTel: A Distributed Mobile Sensor Computing System," In *Proc. of SenSys'06*, pp. 125–138, 2006.
- [17] B. Hoh, M. Gruteser, R. Herring, J. Ban, D. Work, J.-C. Herrera, A. M. Bayen, M. Annamaram, and Q. Jacobson: "Virtual Trip Lines for Distributed Privacy-Preserving Traffic Monitoring," In *Proc. of MobiSys'08*, pp. 15–28, 2008.
- [18] P. Mohan, V. N. Padmanabhan, and R. Ramjee: "Nericell: Rich Monitoring of Road and Traffic Conditions using Mobile Smartphones," In *Proc. of SenSys'08*, pp. 323–336, 2008.
- [19] R. K. Balan, N. X. Khoa, and L. Jiang: "Real-Time Trip Information Service for a Large Taxi Fleet," In *Proc. of MobiSys'11*, pp. 99–112, 2011.
- [20] 玉井森彦, 安本慶一, 福倉寿信, 岩井明史: "道路上の交通量変化に基づく効率のよい渋滞動画データ収集および配信方式," 情報処理学会研究報告, Vol. 2012-MBL-61, No. 29, pp. 1–8, 2012.