「マルチメディア，分散，協調とモバイル
(DICOMO2019) シンポジウム」 令和元年7月

協調自動走行における集団認知のための MQTT メッセージの削減

長嶋 秀幸[1] 塚田 学[1] 落合 秀也[1] 江崎 浩[1]

概要：自動運転において，車々間通信により車両の動的な情報をやり取りすることで道路交通の安全性を向上させることができ，今後自動車には無線通信を行う機器が搭載されていくだろう．現在普及している方法は専用の無線を用い，アドホックな方式を取っている．これに加えて自車両の周囲の物体情報も付加して送信する研究や広域な情報の送信を行うためにマルチホップで情報を送信する研究が存在する．全ての車両が互いの情報を共有していることが理想的だが，やり取りされるデータ量の多さからネットワークへの負荷が問題となる．本研究ではこの問題を解決するためにアドホックな方法ではなく外部のサーバを経由し効率的に物体情報を共有する手法を提案する．物体情報を一定の区間ごとに分割して管理し走行ルートに従って情報を取得することで効率的なデータ配送をすることを試みている．また情報を収集した段階で重複した物体の情報を削除することで送受信されるデータ量自体の削減も行っている．

Message Reduction of MQTT-based Collective Perception among Connected Autonomous Vehicles

HIDEYUKI NAGASHIMA[1] MANABU TSUKADA[1] HIDEYA OCHIAI[1] HIROSHI ESAKI[1]

1. はじめに

1.1 協調型 ITS

自動車は今日，人々の日常生活に必要不可欠な交通手段のひとつとなっている．しかしその一方で，自動車は交通事故や交通渋滞，大気の汚染，エネルギー消費の増加など様々な問題をもたらしている．これらの問題を解決することを目的として高度道路交通システム（Intelligent Transport System; ITS）が考えられた．ITS とは人・道路・車両を一体のシステムとして扱い，情報通信技術を用いることにより，道路渋滞の状況や交通事故の情報，周囲の自動車の位置・速度などの様々な情報をやり取りすることで，道路交通の安全性や効率，快適さの向上を目指すものである．

その中でも自動運転を含む ITS はセンサネットワークや機械学習などの技術の進展などに伴い，急速に発展している分野である．自動運転の実現においては，周囲の道路交通の状態や人・車両といった障害物の情報などを収集し，そのデータから自動運転車に対して最適な制御を行うことが必要になる．情報収集の手段に関して，自動車に搭載された全方位レーザやカメラなどのセンサを用いる自律型と呼ばれるものと，これに加えて道路に設置した機器（路側装置）や他の自動車に搭載されている機器との通信によって情報を得る協調型と呼ばれるものに分類することができる．

この協調型の ITS のための通信規格の標準化としては既に ETSI（European Telecommunication Standards Institute）が策定した ITS-G5 Standard[1] などが存在している．この標準では自車両の動的な情報を周囲の車両に発信する CAM（Cooperative Awareness Message）[2] と道路上で発生した様々なイベントを周囲の車両に発信する DENM（Decentralized Environmental Notification Message）[3] をメッセージとして定義している．自律型の ITS のみでは得ることが難しい道路渋滞の状況や交通事故の情報，自動運転車から死角となっている位置にある他車両の情報などを協調型の ITS によって手に入れることが可能になる．

[1] 東京大学大学院情報理工学系研究科

© 2019 Information Processing Society of Japan

1.2 無線通信技術

協調型 ITS のための車両，または路側装置間の通信方法の中で，専用の基地局を用いず端末同士が直接通信する，もしくは端末自体の中継機能により形成された通信路を用いて通信するものは Vehicular Ad-Hoc Network（VANET）と呼ばれる．専用の基地局を中継しないため，リアルタイム性が求められる道路交通の安全性を高めるための情報などは，現在この VANET を用いてやり取りされる傾向にある．

VANET における車々間通信を可能にする無線通信技術で代表的なものとして専用狭域通信（Dedicated Short Range Communication; DSRC）がある [4]．小さいオーバヘッドで通信を行うことができ，大きいデータ転送量を少ない通信遅延とレイテンシで実現するために使用される．DSRC は日本・米国・欧州でそれぞれ異なる標準化が行われている．通信が可能な距離としてはそれぞれ 30m，1000m，15-20m とされている [5]．

この DSRC のベースとなっている IEEE 802.11p はまた ETSI によって標準化が行われている ITS-G5 Standard の物理層と MAC 層にも使用されている [6]．この ITS-G5 では車々間通信に用いるメッセージとして CAM と DENM の 2 つが検討され，標準化が進められてきた．CAM は路側装置や車両の存在位置や速度，進行方向，車両の属性といった動的な情報を扱うためのメッセージとなっている．メッセージの送信はシングルホップで到達可能な範囲に存在する車両に対して，一定の周波数でブロードキャストするという形を取っている．一方，DENM は道路交通におけるイベントを検出した際に発信されるイベント駆動型のメッセージである．イベントとしては一方通行違反の検知や交通渋滞の検知など様々なものが定められている．各イベントに対して，そのイベントの DENM の送信を終了する条件とそのイベントを通知する必要のある範囲が設定されており，各車両はイベントの検知から終了条件を満たすまで一定の周波数でメッセージを送信する．また CAM がシングルホップであったのと異なり DENM はマルチホップで送信される．この CAM と DENM のやり取りによって他車両の位置，渋滞などといった道路交通の状態を協調して把握して，車両の効率的で安全な動作を計画することが出来る．

また車々間・路車間の通信を可能にする技術としては携帯用回線の利用も考えられている．上で紹介した DSRC と ITS-G5 は共に IEEE 802.11p をベースとしていたが，QoS や移動性のサポートに制約があった [7]．そこで LTE を車々間通信に利用することで IEEE 802.11p に比べて QoS のサポート・通信可能範囲の拡大・最大データレートの向上などを高い信頼性と小さいレイテンシで行うことが試みられている [8]．この携帯用回線ベースの車々間通信の標準化は 3G や LTE など携帯電話向けの通信規格の標準化を行っている組織である 3GPP（The Third Generation Partnership Project）によって 4G の device-to-device モードをベースとしてなされている [9]．DSRC ではデータレートは 2-6Mbps 程度であるとされていたが，携帯用回線を用いた車々間通信ではデータレートは 100Mbps まで向上させることができるとされている．

1.3 オープンソース実装

本研究では実装に際して自動運転のためのオープンソースソフトウェアである Autoware を使用した．Autoware は ROS をベースに開発されており，センサからの点群データの取得や物体の認知・トラッキング，運転制御などの機能を提供している．

2. 現状の課題

2.1 Autoware への通信機能追加

Autoware は自律型の自動運転のための様々な処理を提供している．しかし本研究に利用できるような車両が認識している物体情報を他車両と共有するような仕組みは無い．そのため他車両との通信を行うことのできる機能を実装する必要がある．

2.2 ネットワークへの負荷

車々間通信により車両の情報と車両の周囲の物体情報を共有することにより，本来であれば認識することの出来ないような建物の影や大型車両の影に隠れてしまうような物体も認識することが出来る．安全性を向上させるためには，理想的には死角に存在する物体や車両の情報を全ての車両と交換し取得することが求められる．しかし物体情報のマルチホップのブロードキャストや標準の自車両情報を送信するためのメッセージへの物体情報の付加を単に行うとやり取りされるデータが爆発的に増え，ネットワークへの負荷が問題となる．このことを考慮し効率的な情報の配送を行うことが必要になる．

2.3 情報のリアルタイム性

道路交通における物体の位置・速度・加速度などの動的情報は常に変化し続けるものである．交通の安全性を高めるために使用する情報はできる限り最新のものであり，また十分な頻度で取得出来ることが必要となる．ネットワークへの負荷を考慮したシステムであっても，車々間で情報がやり取りされる際の伝送遅延はなるべく小さいものでなければならない．また伝送遅延の他に物体情報に対して何か処理を施すような場合には，処理時間によって取得する情報が古いものにならないように注意する必要がある．

© 2019 Information Processing Society of Japan

3. 関連研究

Gunther らの研究 [10] では，車両に搭載されたセンサからのデータを他車両と共有するためのメッセージを定義している．メッセージは Environmental Perception Message (EPM) と名付けられ ETSI ITS G5 アーキテクチャの中で利用できるように考えられている．速度や方向など車両の動的な状態を示すための部分，設置位置や視野角などのセンサの情報を示すための部分，認識した物体の速度や方向，大きさといったデータを示すための部分に分かれており CAM に即したデータの定義を行っている．車両間の通信としては 802.11p を用いている．この論文中ではネットワークの負荷が大きくなるためセンサの情報は 10 個分まで，認識した物体の情報は 20 個分までに制限していた．データのサイズは最小で 37byte で最大で 709byte となっている．論文内では 2 台の車両で EPM の実験を行っている．実験では LiDAR センサとレーダーセンサが搭載している先行する車両が周囲の状況を認識し EPM を作成し，後ろに続く車両へと送信している．後続の車両からは検知できない範囲に障害物を置き，EPM を利用した場合，利用しなかった場合の障害物に衝突するまでの時間を測定していた．結果として EPM を利用しなかった場合よりも平均で 2.25 倍衝突までの猶予を大きくすることが出来ていた．

同じく Gunther らはその後の研究 [11] でネットワークシミュレータと道路交通のシミュレータを組み合わせ，ITS のための LTE と IEEE 802.11p の通信を実験できるシミュレータを開発している．シミュレーションでは中央サーバで街中の車両の位置を把握するようなアプリケーションを想定している．論文中では 3 つのシナリオでシミュレーションを行い，位置情報の正確性やネットワークへの負荷を計算していた．自車両の情報のみ中央サーバへ送信するシナリオに比べ，他車両との通信をアドホックに行っているシナリオでは大きく通信量が増加していた．このように自車両の周囲の状況も含めて情報共有を行おうとすると通信量は爆発的に増加してしまうため，データの集約や送るデータの選別などが必要になることが分かる．

これらの研究においてはメッセージは全て周囲の車両へのブロードキャストによって配送される．シミュレーションでも示されていたようにその場合にはネットワークへの負荷が大きくなるため，効率的な情報のやり取り方法が求められる．

4. 本研究の目的

4.1 Autoware への通信機能追加

Autoware に他車両との通信機能を追加する必要がある．無線規格としては LTE を使用することを想定し，また通信のプロトコルとしては MQTT を使用する．コントロールの難しいアドホックなネットワークでのブロードキャストではなく，外部のサーバを経由した情報の通信を選択し，機能の実装は既存の Autoware の機能には影響を与えない形で行う．

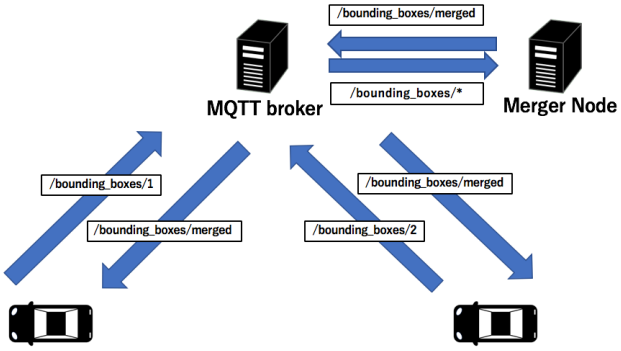


図 1　提案手法の概要

4.2 地理位置を限定した情報の配送

物体情報を効率的にやり取りするために，取得する物体情報の範囲を地理的に限定する．自動運転においては事前に走行するルートが決定する．車両が物体情報を取得する際には，その走行ルートに従って必要な範囲の物体情報だけを取得する．これによって不必要な通信を削減しネットワークへの負荷を軽減する．

4.3 メッセージ削減

ネットワークへの負荷を軽減するために，やり取りされる情報のデータ量自体を減少させる．同一の物体が複数の車両から検知された場合に，その物体の情報が重複して収集されることが考えられる．各車両から物体の情報を収集した後に，その重複した物体の情報を削除する処理を行う．この処理によって配送されるデータ量を削減する．

5. 提案手法

車々間のアドホックな通信による物体情報の共有ではやり取りされるデータ量が大きくなりネットワークへの負荷が大きくなってしまう．この問題を解消することを目的にブロードキャストによる情報共有ではなく既存の通信インフラと携帯回線を用い効率的に物体情報を共有する方法を提案する．本章では物体情報共有システムの要求事項や情報の送受信の実装方法，情報の管理方法などを詳細に説明する．

5.1 手法の概要

提案手法の概要を図 1 に示す．本研究では MQTT によって物体情報を送受信する．実装は自動運転用のソフトウェアである Autoware 上で行い，物体情報としては Autoware 内部のデータである BoundingBox を利用した．

© 2019 Information Processing Society of Japan

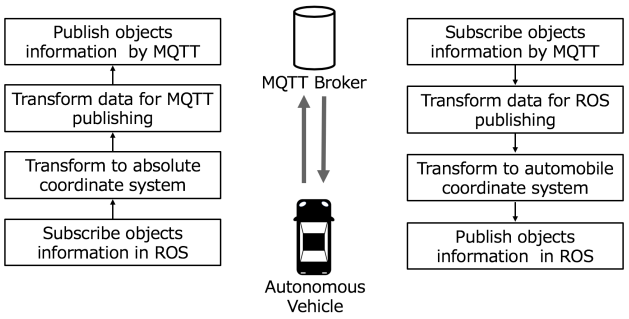


図 2 Processing flow of object information exchange between autonomous vehicles and MQTT broker.

物体情報の送信時においては一定の区間ごとに区切って収集を行い、受信では各車両が走行ルートに従って必要な情報を取得するという方法をとった．また送受信されるデータ量の削減のために，一度物体情報を収集した段階で複数の車両から送信された重複した物体の情報をマージする処理を行った．

5.2 車両からの物体情報の送受信

物体情報の送受信は Autoware 上で実装した．処理の流れを図 2 に示す．まず Autowre 内で物体情報のデータを取得する．このときの物体情報の座標系は自車両を中心としたものになっており，そのままでは他車両と共有することはできないものとなっているので座標系の変換を行う必要がある．Autoware が実装されている ROS（Robot Operating System）で定義されている座標変換用の関数を用いて絶対座標系への変換を行った．座標変換を行った後に，物体情報を MQTT を用いてデータの転送を担当する MQTT ブローカへと送信する．MQTT ではデータにトピックを命名して送受信をしている．トピックの命名法については次節にて説明する．物体情報を取得時には送信の際とは逆の手順を行う．トピックを指定して MQTT により目的の物体情報を指定し取得する．受信した物体情報の座標系は絶対座標系であるので自車両で使用できるようにするために座標系を自車両を中心としたもの変換する．

5.3 区間を分割しての物体情報収集と取得

物体情報は一定の区間ごとに分けて収集する．MQTT のトピック名を利用する事によりこれを実現する．トピックの命名は MGRS（Military Grid Reference System）?のコードを使用する．MGRS とは地球上のポイントをラベルで表したもので，緯度と経度を区切ったグリッドゾーン，100,000 メートル格子 ID，X 座標・Y 座標からなる．グリッドゾーンは 2 桁の数字と 1 文字の英字，100,000 メートル格子 ID は 2 文字の英字で表され，X 座標・Y 座標の桁数により 10km 四方の範囲から 1m 四方の範囲まで表す

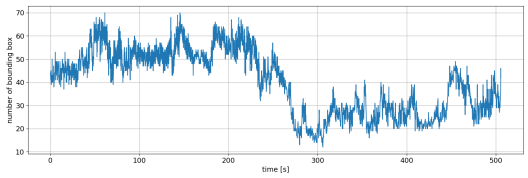


図 3 Number of bounding boxes transmitted in recorded driving data.

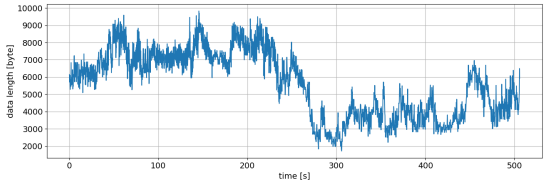


図 4 Data length of bounding boxes transmitted in recorded driving data.

ことが出来る．物体情報の取得時には自動運転で事前に決定される局所的な走行ルートを参照する．車両が通る経路を予め確認し，必要な範囲の物体情報を適切なタイミングで取得することで効率的な情報の取得を目指している．

5.4 集約した情報のマージ

複数の車両から物体情報を収集すると，同一の物体に関する情報が重複して送信されてくることが考えられる．情報を収集した段階でその重複した物体の情報を削除する処理を行う．この処理を行うことにより，各車両へと送信する情報を削減することが出来る．各車両からの物体情報は異なるタイミングで届く．処理を行う時点から一定の時間内の物体情報を対象としマージ処理を行い結果の配信をする．重複の判定は物体の重なりを計算し行っている．重なりのある物体は同一のものとし片方の情報を削除する．

6. 実験と評価

6.1 利用したデータ

実験に使用したデータは，実際に自動運転を行った際の約 8 分間ほどのレコードデータである．レコードデータを Autoware で再生し，MQTT ブローカへ物体情報の送信・受信を行った．MQTT のブローカは Microsoft Azure 上にグローバルなサーバとして稼働させたものを使用した．物体情報の転送の際の遅延時間やマージ処理にかかる処理時間を計測した．図 3 と図 4 にレコードデータのやり取りしている物体の個数とそのデータ量を示す． 物体情報のデータ量は物体の個数に比例している．実データでの送信される物体の個数の平均は 43 個，データ量の平均は約 6kbyte であった．

6.2 物体情報の通信遅延測定

まず MQTT での物体情報の送信から受信までの通信遅

© 2019 Information Processing Society of Japan

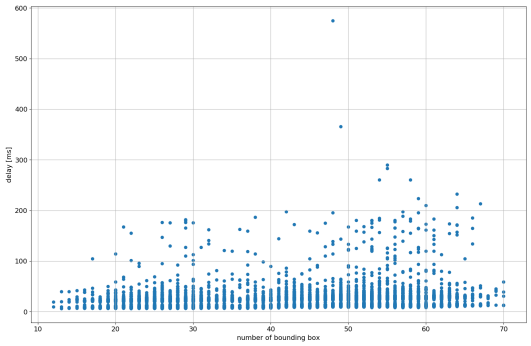


図 5 Communication delay per number of transmitted bounding boxes.

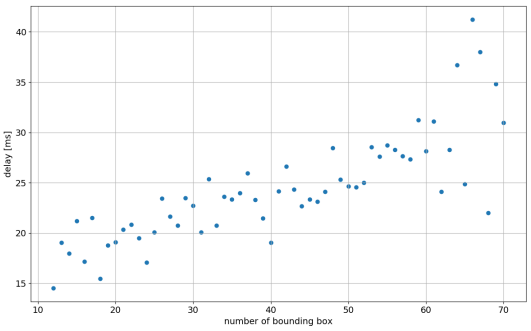


図 6 Average value of communication delay per number of transmitted bounding boxes.

延時間を計測した．計測した時間は図 2 で示した座標変換などの一連の処理を含めたものである．送信する物体情報の個数ごとの情報を送信してから受信するまでの遅延時間を図 5 に，個数ごとに平均をとったものを図 6 に示す．図を見ると物体情報の個数が大きくなればなるほど遅延も大きくなっていることが分かる．これは計測において物体情報の座標変換の処理なども含めて行っているため，物体の個数が増加するほど変換に時間がかかるためであると考えられる．今回の実験で利用した実データほどの物体情報の個数の変化では MQTT での通信そのものの遅延は増加しなかった．

6.3 マージ処理の計測

次にマージ処理による物体情報の削減が正しく動作しているかを確認する．同時刻に同一の場所で 2 つ以上の Autoware を動作させて記録した実データが存在しないため，今回の実験においては 1 つの実データを自車両の情報としても他車両の情報としても利用し検証を行った．図 7 にマージ処理を行う前とマージ処理を行った後の物体情報に含まれる物体の個数を示す．1 つのデータを自車両と他車両の情報として検証を行ったためマージ処理後には物体の個数は半分ほどになっているはずである．図 7 を見ると

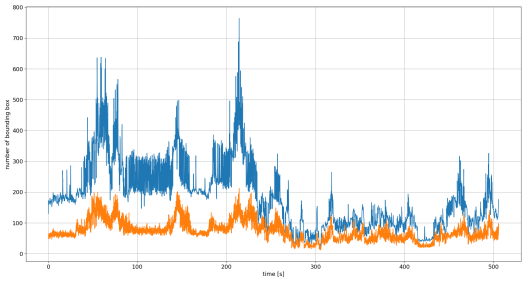


図 7 Number of bounding boxes before merging (blue) and number of bounding boxes merged (orange).

マージ処理前の物体数に比べてマージ処理後の物体数が半分ほどに削減されていて正しく処理が動作していると考えられる．

マージ処理の処理時間は物体数により影響を受けると考えられる．物体数が増加することにより増加する処理時間がリアルタイム性に影響を与えるものかどうかを確認した．計測の結果では物体情報の個数の変化によるマージ処理の処理時間は数ミリ秒以内に完了することが出来ていた．

7. 結論と今後の課題

本研究では車々間のアドホックな通信による物体情報の共有では，やり取りされるデータ量が大きくなりネットワークへの負荷が大きくなってしまうという問題の解決のために，ブロードキャストによる情報共有ではなく MQTT を利用し，外部のサーバを経由しての通信を用いて効率的に物体情報を共有する方法を提案した．MGRS のコードを MQTT のトピックとして物体情報を一定の範囲ごとに分割して収集し，各車両が走行予定ルートに従って必要なデータを適切なタイミングで取得することによって効率的な物体情報の伝搬を試みた．また物体情報を収集した段階で，重複した物体の情報を削除しやり取りされるデータ量を削減することも行った．自動運転用のソフトウェアである Autoware 上で機能を実装し，実際の自動運転時のデータを用いて通信の遅延時間やマージ処理の処理時間などを計測する実験も行い，提案した手法で取得したデータが安全性向上のために利用できるためのリアルタイム性を有しているか確認した．

今後の課題としては，まず初めに複数の車両が物体情報を共有し合うような状況で MQTT による通信がどれほど遅延するかを計測することである．現在の実装でどれほどの車両数が安全性のために利用できるほどの遅延時間で物体情報の共有をし合うことが出来るのかを実験する必要がある．またやり取りされるデータ量の削減について現在は物体の重なりによって同一の物体であると判定しているが，速度や移動方向などの情報も利用することができればより正確に同一の物体であることを判定できる可能性があ

© 2019 Information Processing Society of Japan

る．ネットワーク上のデータ量をさらに削減する方法として物体情報を送信する際に，建物や街路樹といった走行に関連の少ない静的な物体の情報を送信することがないように送信側の車両でフィルタリングするといった方法が考えられる．

参考文献

[1] ETSI, T. (2011). Intelligent transport systems (its); vehicular communications; basic set of applications; part 2: Specification of cooperative awareness basic service. Draft ETSI TS, 20, 448-451.

[2] ETSI, E. (2014). 302 637-2 V1. 3.1-Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service. ETSI, Sept.

[3] ETSI, E. (2014). 302 637-3 V1. 2.1-Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Application; Part 3: Specification of Decentralized Environmental Notification Basic Service. ETSI, Sept.

[4] Kenney, J. B. (2011). Dedicated short-range communications (DSRC) standards in the United States. Proceedings of the IEEE, 99(7), 1162-1182.

[5] Jindal, V., & Bedi, P. (2016). Vehicular ad-hoc networks: introduction, standards, routing protocols and challenges. International Journal of Computer Science Issues (IJCSI), 13(2), 44.

[6] ETSI, E. (2010). 302 665 V1. 1.1: Intelligent Transport Systems (ITS). Communications architecture.

[7] Atallah, R. F., Khabbaz, M. J., & Assi, C. M. (2015). Vehicular networking: A survey on spectrum access technologies and persisting challenges. Vehicular Communications, 2(3), 125-149.

[8] Seo, H., Lee, K. D., Yasukawa, S., Peng, Y., & Sartori, P. (2016). LTE evolution for vehicle-to-everything services. IEEE communications magazine, 54(6), 22-28.

[9] Seo, H., Lee, K. D., Yasukawa, S., Peng, Y., & Sartori, P. (2016). LTE evolution for vehicle-to-everything services. IEEE communications magazine, 54(6), 22-28.

[10] Gunther, H. J., Mennenga, B., Trauer, O., Riebl, R., & Wolf, L. (2016, December). Realizing collective perception in a vehicle. In Vehicular Networking Conference (VNC), 2016 IEEE (pp. 1-8). IEEE.

[11] Gunther, H. J., Timpner, J., Wegner, M., Riebl, R., & Wolf, L. (2017). Extending a holistic microscopic IVC simulation environment with local perception sensors and LTE capabilities. Vehicular Communications, 9, 211-221.

© 2019 Information Processing Society of Japan