

車線分割に基づきエッジサーバを配置した ダイナミックマップシステムのスケーラビリティ向上

細野 航平^{1,a)} 榎 晶彦² 渡辺 陽介³ 高田 広章^{3,4} 佐藤 健哉^{1,5}

受付日 2020年8月20日, 採録日 2021年2月2日

概要: 近年, 自動運転車両に搭載されたセンサ情報を無線通信経由で共有し安全性と効率を目指した協調型自動運転の研究が始まっている. さらに, 共有したセンサ情報を管理してアプリケーションを実行するための情報通信プラットフォームであるダイナミックマップシステムが検討されている. しかし, インターネット上のクラウドで動作するダイナミックマップシステムでは, センサ情報を送受信する車両台数が増加した場合, スケーラビリティに関しての懸念がある. そこで, クラウドで管理している情報を地理的に分散配置したエッジサーバにおいて管理することで, アプリケーションを効率的に実行可能になると考えられる. また, 移動する車両に対してエッジサーバとの接続や, エッジサーバ間での連携が問題となる. 本稿では, 車両が走行する道路上のエリアを「レーンセクション」として分割し, それに基づいた ID を用いてエッジサーバを割り当てるダイナミックマップシステムを実装し, 管理する車両の台数に応じた処理遅延のスケーラビリティを評価することで, エッジサーバ割当て方式の有効性を検証した.

キーワード: ITS, 協調型自動運転, ダイナミックマップ, エッジコンピューティング

Implementation and Scalability Evaluation of Dynamic Map System with Edge Server Based on Lane Section

KOHEI HOSONO^{1,a)} AKIHIKO MAKI² YOSUKE WATANABE³ HIROAKI TAKADA^{3,4} KENYA SATO^{1,5}

Received: August 20, 2020, Accepted: February 2, 2021

Abstract: In recent years, connected autonomous vehicles have been significantly studied. Connected vehicles use a variety of sensors, capable of sensing their environment. The dynamic map is a common integration platform, thus, incorporates the real-time traffic information into high accuracy 3D map. Due to this unique mechanism, a dynamic map attracts remarkable attention to some applications. However, the increase in traffic volume using a dynamic map platform, in case of overload in the client requests and responding by a single cloud, triggered to increase in the communication time and mislaid the data packets. Therefore, there is a need for a sustainable communication network. As a solution to this problem, in this study, we proposed the multiple interconnected distributed edge, geographically. Also, it is a problem to relate the moving vehicles to the edge servers and to coordinate between the edge servers. By assigning the “Lane Section ID” with respect to control the flow of client request to each edge, which primarily act as a sub cloud, it will enhance the communication time and secure data packets. Moreover, enforce the implementation of a dynamic map platform. We have evaluated the communication time for each edge and missing data packet rate.

Keywords: ITS, connected car, dynamic map, edge computing

¹ 同志社大学大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Engineering, Doshisha University, Kyotanabe, Kyoto 610-0321, Japan

² 富士通株式会社
Fujitsu Limited, Kawasaki, Kanagawa 215-8588, Japan

³ 名古屋大学未来社会創造機構
Institutes of Innovation for Future Society, Nagoya University, Nagoya, Aichi 464-8601, Japan

⁴ 名古屋大学大学院情報学研究科
Graduate School of Informatics, Nagoya University, Nagoya, Aichi 464-8601, Japan

⁵ 同志社大学モビリティ研究センター
Mobility Research Center, Doshisha University, Kyotanabe, Kyoto 610-0321, Japan

a) kohei.hosono@nislabs.doshisha.ac.jp

1. はじめに

現在、車両に搭載されたセンサにより走行環境を認識し、ドライバーへの警告や自動で危険を回避する高度な安全運転支援システムや自動運転の研究・開発が活発に行われている [1], [2], [3], [4]. しかし、車両に搭載されたセンサからでは、見通せる範囲の対象物は検知できても、見通せない範囲は検知できない。たとえば、見通しの悪い交差点における出会い頭の衝突や、物かげからの急な飛び出しには対応が困難であるという問題がある。これらの状況に対応するため、無線通信技術を利用して、走行中の車両間、あるいは、車両と路側機の間で相互に情報交換することにより、安全性向上を目指した協調型 ITS (Intelligent Transport Systems) の研究が行われている [5], [6], [7], [8].

協調型 ITS の応用例 (アプリケーション) として、交差点衝突危険警告、渋滞や路面状況、信号状態の情報提供に加えて、高速道路での合流支援など、多様な応用が検討されている [9], [10], [11], [12]. 現在は、アプリケーションごとにそれぞれの情報が個別に管理・処理されているが、ダイナミックマップ [13], [14], [15] として、それぞれの情報を基盤となる地図情報をもとに統合的に管理することで、効率的にアプリケーションが実現可能となる [16]. 一般的に認知されているダイナミックマップの構成を図 1 に示す。情報の更新頻度に応じて、静的な道路地図の上に動的な情報が階層化された構成となっている。

ダイナミックマップの動的な情報として一般に 100 ミリ秒周期で車両から送信されるセンサ情報などが管理され、これに基づいて安全運転支援や協調型自動運転を実現する交通安全への影響度が高いアプリケーションが動作するため、低遅延での情報処理が求められる [17], [18]. 通常、ダイナミックマップシステムはインターネット上のクラウドの利用を想定するが [19], クラウドに膨大な車両からのデータ

が集約されると処理負荷や通信遅延の原因となりスケラビリティが問題になると考えられる。しかし、ダイナミックマップ上で動作するアプリケーションは、交差点衝突危険警告や合流調停など交通安全への影響度が高いものも多い。それらのアプリケーションは、対象範囲となる車線に存在するすべての車両のデータを受信し、低遅延で通信・処理を行う必要がある。そこで、クラウドと車両の間の位置にエッジサーバを配置することで、処理負荷の分散や通信遅延の軽減が期待されている [20], [21], [22], [23]. しかし、車両は高速に移動するため、継続した情報提供を行うためには、エッジサーバと車両との接続方法や車両の管理方法も問題となり、車両から送信されたデータの到達を保証し、エッジサーバを割り当てる必要がある。

本研究では、交通安全への影響度が高いアプリケーションが動作するダイナミックマップにおいて、車両の台数の増加にともない問題となるクラウドのスケラビリティの問題を軽減するため、携帯電話の基地局などにエッジサーバを配置し、道路上を移動する複数の車両に対して、効率的なエッジサーバの割当て方式を検討する。

2. エッジサーバを配置したダイナミックマップシステム

2.1 エッジサーバ利用

エッジサーバの配置には携帯電話基地局周辺やインターネットの入り口などいくつかの議論があるが [24], [25], [26], コネクテッドカーにおいては ETSI が提案する携帯電話基地局周辺に設置するモデルが有力であり [27], [28], [29], 本研究では、そのモデルに従い、移動する車両からデータを送受信する携帯電話基地局に該当する位置にエッジサーバを配置する。車両は、エッジサーバへデータを送信する。ここで車両から送信されるデータは車両 ID, 車両位置, 速度, 進行方向, タイムスタンプなど [30], [31], [32] であり、車両位置は GPS [33] やスキャンマッチング [34] で測位した車両位置情報を利用して取得する。本研究におけるエッジサーバを配置したダイナミックマップシステムにおいて、クラウドでは広域的な情報、エッジサーバではリアルタイムな処理が必要な局所的な情報を管理する。本ダイナミックマップシステムは、クラウド、エッジサーバ、車両の 3 層構造のシステム構成となる。ここでは、クラウド、エッジ、車両をノードと呼ぶものとする。

2.2 ダイナミックマップシステムの構成

3 層構造のダイナミックマップシステムでは、車両と最寄りのエッジサーバの間でデータの収集や配信の処理を分散することで、ネットワーク負荷を軽減でき、リアルタイム性の向上が可能となる。クラウドによるダイナミックマップシステムとエッジサーバを用いたダイナミックマップシステムについて、各サーバがデータを送受信するデータ量

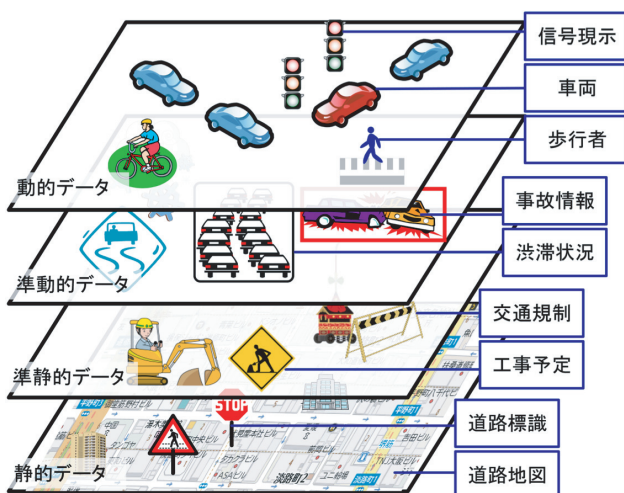


図 1 ダイナミックマップ概要

Fig. 1 Overview of dynamic map.

の比較を図 2 に示す. 何千万台ものコネクテッドカーが接続し, 安全な運転制御のサポート情報をやりとりするネットワークでは, 1 台の車両から 100 ミリ秒周期程度のデータを 1 つのクラウドで受信し, 処理を行うにはネットワーク負荷, サーバの処理負荷, リアルタイム性の観点から妥当ではなく, 大量のデータが集約される. エッジサーバを配置することで各エッジサーバにデータが分散し, クラウドやエッジサーバへのネットワーク負荷が軽減される.

本研究におけるダイナミックマップシステムでは, 各ノードは, OS/ハード, 通信部, データベース (DB) システム, アプリケーションの 4 層からなる. また, 欧州で標準化が進む協調型 ITS システム [35] と同様に各ノードは固有の ID [36], [37], [38] を持つ. ダイナミックマップシステムの構成を図 3 に示す. 各ノードは通信部を通じて通信を行い, 送受信されたデータは各ノードのアプリケーションで処理される. ダイナミックマップシステムの構築により, センサ情報と地図データを連携させる共通基盤として利用可能となり, アプリケーションの構築が容易となる. また, 本稿ではダイナミックマップシステムの通信部について, レーンセクション ID に基づくエッジサーバ割当てについて提案しており, 今後は通信部での機能を用いて DB システムやアプリケーションとのより詳細な連携を検討している. 特に DB システムは, 静的情報を更新する

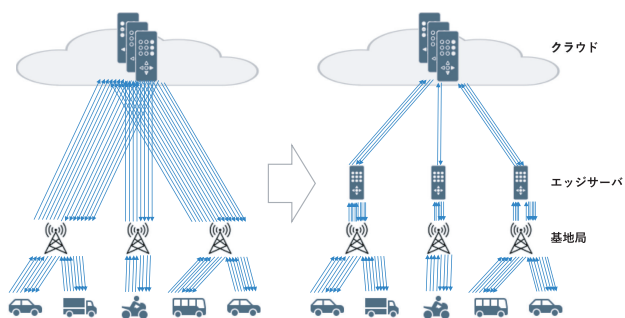


図 2 エッジサーバの配置とネットワーク負荷の比較
Fig. 2 Placement and operation of edge server.

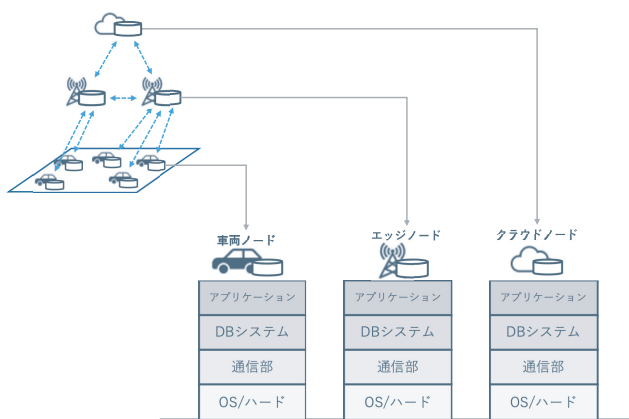


図 3 ダイナミックマップシステムの構成
Fig. 3 Architecture of dynamic map system.

ワンショットクエリや動的情報を更新する継続クエリを使用するリレーショナルデータベースで構成されており, DB システムは他 DB とのストリームデータなどを共有する際に通信部を介してクエリを実行する.

2.3 通信手段

本システムでは, 車両とエッジサーバ, クラウドとの通信には IP を利用する. クラウドのみを利用するダイナミックマップシステムにおいて, 車両からデータを送信する場合, 車両の IP アドレスを送信元として, クラウドの IP アドレスを宛先とする. クラウドから車両にデータを返送する際は車両の IP アドレスを利用することができる. しかし, エッジコンピューティングを用いた構成では, クラウドは車両からのデータを直接受信していないため, 宛先となる車両の IP アドレスを特定できない.

そこで, 本システムにおけるエッジサーバの通信部では, エッジサーバが車両からデータを受信した際に, 送信した車両 ID をクラウドに通知することで, クラウドではどのエッジサーバがどの車両のデータを受信したかを判別可能となる. クラウドではこの集約した ID を利用することにより, 移動している特定の車両に対してクラウドや, エッジサーバ, あるいは, 別の車両からの通信を可能にすることができる. また, 車両が移動して送信先のエッジサーバが切り替わった際にのみ, エッジサーバからクラウドに対して通知するため, 車両のデータを定期的にクラウドに直接送信する場合と比較して, 通信負荷を軽減することが可能となる. エッジサーバによる通信負荷軽減について図 4 に示す.

移動する車両は複数のエッジサーバを切り替えながら走行するため, 車両からデータを送信する際の宛先となるエッジサーバの IP アドレスを一意に設定できない. その解決策として, 位置情報に対応する近隣のエッジサーバの IP アドレスを紐づけた情報を各車両内部に事前に持たせる方法や, 位置情報と近隣のエッジサーバの IP アドレス情報を管理しているサーバに対して問合せをして, 現在位置に対応するエッジサーバの IP アドレスを解決するとい

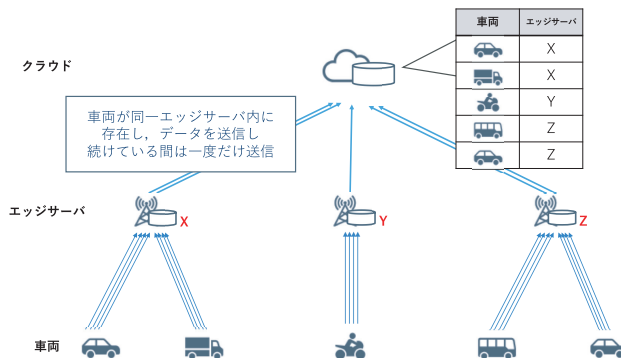


図 4 エッジサーバによる通信負荷軽減
Fig. 4 Reduction of communication load by edge server.

表 1 車両が送信する UDP データフォーマット

Table 1 The format of the data sent by the vehicle.

データ区分	サイズ
IP ヘッダ	40 Byte
UDP ヘッダ	8 Byte
独自ヘッダ	80 Byte
ペイロード	1,030 Byte

う方法がある。しかし、前者の場合、すべてのエッジサーバの情報を車両に持たせる必要があり、各車両が保持している情報の更新処理も複雑になる。また、各車両は車両自身が持つエッジサーバの情報をもとにデータを送信するため、ダイナミックマップが動作する各エッジサーバは対象となる範囲のすべての車両データを受信できているかを知ることができない。さらに、無線通信の状況により必ずしも目的のエッジサーバにつながるとは限らない。後者の場合、データを送るまでにエッジサーバの IP アドレス情報を管理するクラウドに問合せを行い、エッジサーバの IP アドレスの解決が必要となるため、ネットワークの負荷が増大する。

この問題を解決するため本システムでは、車両からのエッジサーバにデータを送信する際の宛先 IP アドレスとしてユニキャストアドレス [39] を使用する。これにより、車両はどこにいても、クラウドやエッジサーバのネットワーク構成を意識することなく、特定の IP アドレスを用いて近隣のエッジサーバにデータを直接送信することが可能となる。

一方、エッジサーバから車両へ通信を行う場合、エッジサーバは送信先となる車両の IP アドレスを知る必要があるが、本システムでは、エッジサーバから車両に対する通信にはマルチキャスト通信 [40] を利用する。各車両の通信部では受信したデータ内の宛先となる車両 ID を見て受信もしくは廃棄の判断をすることができる。これによりエッジサーバが配下の車両のユニキャストアドレスを知らなくても送信することが可能である。また、同一のメッセージであれば複数の車両に同報通知することにより、ネットワーク内の通信輻輳を軽減できる。

本研究において、車両が送信する UDP データにはセンサデータなどのペイロードに加えてヘッダが付与される。このヘッダとは、ダイナミックマップシステムにおいて車両データを管理するためのものであり、自身を特定するための Station ID (SID) やエッジサーバ間での転送を認識するための転送フラグなどを含む 80 Byte である。車両が送信する UDP データのフォーマットを表 1 に示す。

3. エッジサーバ割当て方式

3.1 レーンセクション ID

本研究において、車両がエッジサーバへデータを送信す

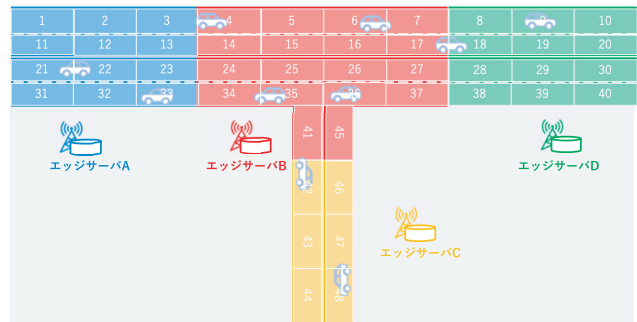


図 5 レーンセクション ID に基づくエッジサーバ割当て

Fig. 5 Edge server arrangement based on lane section ID.

る際に、GPS やスキャンマッチングで測位した車両位置情報を、車線レベル情報を持った詳細地図データと照合し、当該車両が走行するレーンセクション ID に照らし合わせて、その情報をデータに付加してエッジサーバに送信する。このレーンセクション ID とは、車両が走行する道路の車線を特定の長さの区間に分け、それぞれの区間に固有の ID を割り当てたものである。レーンセクション ID の例を図 5 に示す。レーンセクション ID をもとにエッジサーバでアプリケーションが動作するため、各レーンセクションの長さやエッジサーバに割り当てられるセクション数は自由に変更可能であり、効率的にアプリケーションを実行できる。また、分割された地理的エリア（レーンセクション ID の集合）の情報を管理するエッジサーバを管轄エッジサーバと呼ぶ。それぞれのエッジサーバは、対応する色の範囲の車線を管轄しており、その範囲に存在する車両から送信されたデータを集約し、アプリケーションを実行する。エッジサーバは車両から送信されたデータのレーンセクション ID を確認することにより、車両の管轄エッジサーバを特定できる。

エッジサーバは車両から送信されたデータを受信するが、データを受信するエッジサーバは携帯電話基地局の割当てに従って決定される。また、エッジサーバの管轄エリアは、基本的に携帯電話基地局の割当てエリアと同等になるように決定される。そのため、図 6 に示すように、基本的にエッジサーバの管轄エリアと受信エリアは同じである。エッジサーバ A の受信エリアにいる車両が送信したデータは、携帯電話基地局の割当てに従ってエッジサーバ A が受信する。また、エッジサーバ B の管轄エリアにいる車両が送信するデータはエッジサーバ B に実装されているアプリケーションで実行される必要がある。この受信エリアと管轄エリアは基本的に同じになるように構成される。しかし、エッジサーバの管轄エリアと受信エリアをそれぞれ定義するのは、この 2 つのエリアが意図せず異なってしまう場合や、特定のエッジサーバの管轄エリア外にいる車両データを必要とする場合があるからである。

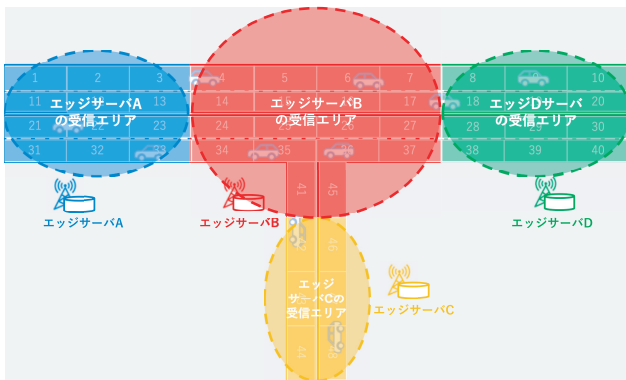


図 6 レーンセクション ID に基づくエッジサーバの受信エリアと管轄エリア

Fig. 6 Receive and control areas of edge servers based on the lane section ID.

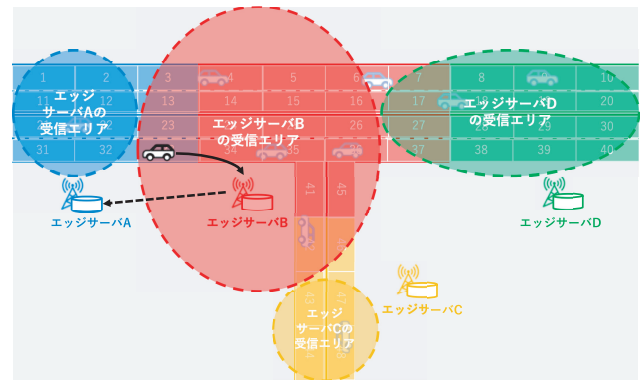


図 8 レーンセクション ID によるエッジサーバ間のデータ転送
Fig. 8 Data transfer between edge servers by lane section ID.

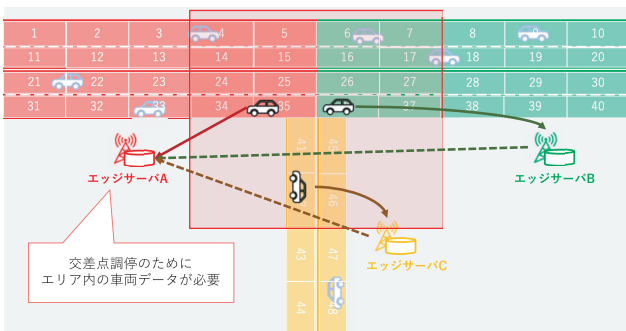


図 7 交差点内に存在するエッジサーバの管轄エリアの境界

Fig. 7 The border of the edge server's control area within an intersection.

3.2 エッジサーバ間のデータ転送

たとえば、エッジサーバが交差点周辺の車両から情報を受け取り、合流調停などの車両の走行状態を判断し、走行指示を行うアプリケーションがエッジサーバに実装されている場合、交差点周辺の車両データを、アプリケーションを実行するエッジサーバに集約する必要がある。エッジサーバの管轄エリアはエッジサーバ周辺の携帯電話基地局の割当てエリアと同等に割り当てられるため、図 7 のようにエッジサーバの管轄エリアの境界が交差点内に位置してしまう可能性がある。このとき、アプリケーションがエッジサーバ A に実装されている場合、エッジサーバ A は、エッジサーバ B とエッジサーバ C が管轄するエリア内に位置する車両データが必要となる。レーンセクション ID を用いないダイナミックマップシステムでは、クラウドに車両データを集約し、そこでアプリケーションを実行する必要があるため、処理遅延や通信遅延が懸念される。

また、携帯電話網などの実際の無線通信では、電波状況によっては意図したアクセスポイントや基地局に関連付けられたエッジサーバがつねに受信されるとは限らない。また、携帯電話網や Wi-Fi などの複数の通信手段を利用する場合、つねに同じエッジサーバが車両から送信されたデー

タを受信するとは限らない。図 7 のように、エッジサーバの管轄エリアと受信エリアを同じように割り当てたとしても、図 8 に示すように、エッジサーバ A が管轄するエリアにおいて、電波状況などの影響により意図せずエッジサーバ B が受信してしまう可能性がある。このような場合、レーンセクション ID を用いないダイナミックマップシステムではアプリケーションをエッジサーバ上で実行することができず、クラウドにデータを集約し、そこでアプリケーションを実行する必要があるため、処理遅延や通信遅延が懸念される。そこで、本研究ではレーンセクション ID を用いることでエッジサーバ間でのデータ転送機能を実現する。エッジサーバは、車両から送信されたデータのレーンセクション ID から、その車両の管轄エッジサーバを判別する。受信したデータの管轄エッジサーバが自身であった場合、必要に応じて通信部から DB システムに送信され、アプリケーションが実行される。受信したデータの管轄エッジサーバが別のエッジサーバであった場合、受信したエッジサーバの上位層には送信されず、通信部間で対象のエッジサーバへとデータ転送される。電波状況などによりエッジサーバの管轄エリアと受信エリアが異なる場合に、車両から送信されたデータはエッジサーバ B が受信するが、このデータを管轄するのはエッジサーバ A であるため、エッジサーバ間でデータ転送を行う。このとき、データを受信したエッジサーバは、レーンセクション ID に基づいて転送の必要性を判断する。したがって、受信側エッジサーバのアプリケーションで処理されるデータ以外の車両データは、転送先エッジサーバのアプリケーションで処理される。よって、特定のエッジサーバが管轄するエリア以外の車両データが必要な場合に、エッジサーバ間での連携を実現し、効率的に処理を行うことが可能となる。

また、特定のエッジサーバの管轄下に多数の車両が存在し、混雑することによるスケラビリティの問題が考えられるため、レーンセクション ID を用いることでエッジサーバの管轄エリアを調整し、負荷分散を実現する機能を検討している。しかし、これらの機能はレーンセクション ID を

用いた負荷分散機構であり、本研究では、あくまでレーンセクション ID によるエッジサーバ割当てとエッジサーバ間の連携機能を提案しているため検討対象範囲外とする。

4. 評価システム構成

本システムを評価するにあたり、クラウド、エッジサーバ、車両となる PC を用意し、ダイナミックマップシステムを構築した。これらを用いて、クラウドによるダイナミックマップシステム、レーンセクション ID を用いないエッジサーバ利用のダイナミックマップシステム、レーンセクション ID を用いたエッジサーバ利用のダイナミックマップシステムを構築した。それぞれのシステムについて、スケーラビリティを評価するために、複数の車両を走行させてシミュレーションを行うが、詳細な計測を行う計測対象車両（計測車両）と、それ以外の車両（負荷車両）に対して、それぞれの車両が送信したデータがアプリケーションで実行されるまでのデータの流について説明する。

クラウドによるダイナミックマップシステムでは、車両は車載センサなどから取得したデータをクラウドに送信する。クラウドはデータを受信すると、データの流として、一時的にキュー（preQ）に保持される。その後、通信部（CS）内でそのデータは自身が管轄する（必要な）データかどうか判断し、自身であればさらに別のキュー（rcvQ）に一時的に保持される。その後、順にクラウド上のアプリケーションに送信され、アプリケーションが実行される。これらのデータの流を図 9 に示す。車両データをもとにアプリケーションが実行され、それらの指示により車両は走行するため低遅延で処理を行う必要があり、キューにデータが溜まらない状態であることが理想である。しかし、車両台数が増加した場合などにクラウドの処理が追いつかなくなると、アプリケーションで処理遅延が発生し、処理を待つデータがキューに蓄積される。

レーンセクション ID を用いないエッジサーバ利用のダイナミックマップシステムにおけるデータの流を図 10

に示す。このシステムでは、車両が取得したデータは最寄りのエッジサーバに送信される。エッジサーバが受信したデータは一時的に preQ に保持され、そのデータは自身が管轄するデータか判断する。ここで、受信したデータがレーンセクション ID を持たない場合、エッジサーバはそのデータをクラウドに転送し、そこでアプリケーションを実行する。そのため、データはエッジサーバの通信部からクラウドに転送され、クラウドの rcvQ に保持された後、順にアプリケーションで処理が行われる。

レーンセクション ID を用いたエッジサーバ利用のダイナミックマップシステムにおけるデータの流を図 11 に示す。車両から送信されたデータは最寄りのエッジサーバが受信し、一時的に preQ に保持される。その後、エッジサーバの通信部でデータ内のレーンセクション ID (LID) からデータの管轄エッジサーバを判断し、必要に応じてエッジサーバ間でデータ転送を行う。データ転送されたデータは、転送先エッジサーバの rcvQ に保持され、順にアプリケーションで処理が行われる。

また、これらの処理は本研究で提案するダイナミックマップシステムで実装したアプリケーションの処理である。しかし、これらのエッジサーバ間のデータ転送機能と、交通支援のためのアプリケーションを同等に実行すると、

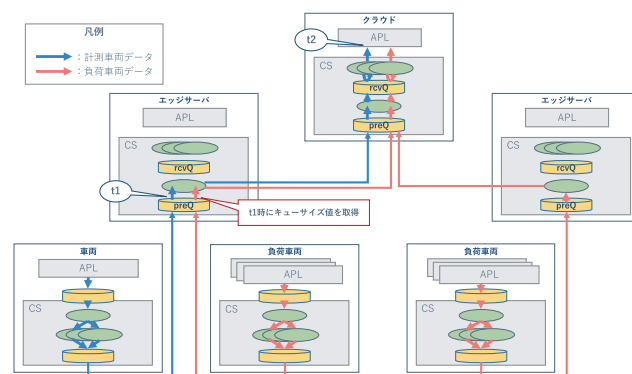


図 10 LID を用いないダイナミックマップシステムのデータの流
Fig. 10 Data flow in a dynamic map system without LID.

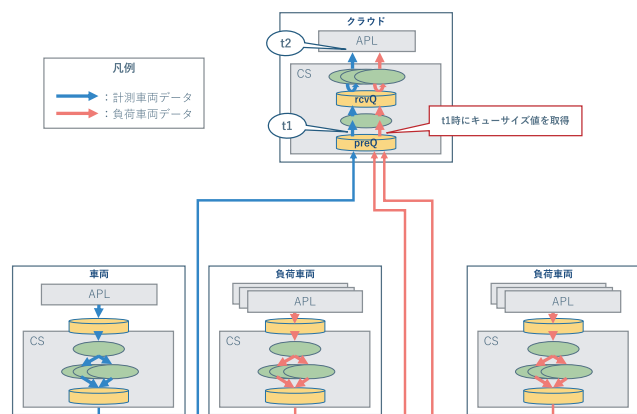


図 9 クラウドによるダイナミックマップシステムのデータの流
Fig. 9 Data flow of dynamic map systems in the cloud.

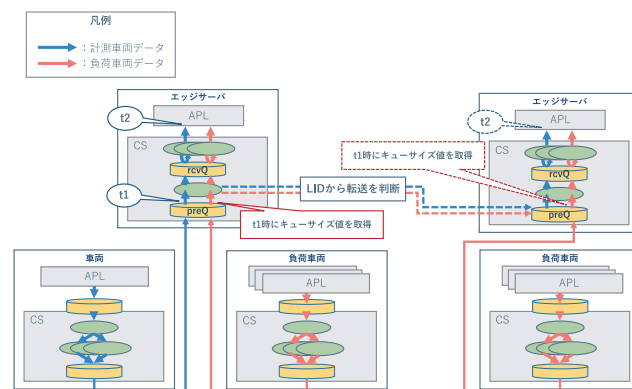


図 11 LID を用いたダイナミックマップシステムのデータの流
Fig. 11 Data flow in a dynamic map system using LID.

表 2 評価システム構成 (クラウド, エッジサーバ)

Table 2 Cloud and edge server configuration.

OS	Ubuntu16.04
CPU	8 コア 16 スレッド (3.60 GHz)
メモリ	16 GB
SSD	256 GB
通信方式	有線 LAN (最大 1 Gbps)

エッジサーバの処理負荷が増大した場合に転送処理も遅延が発生する。そこで、アプリケーション内で、転送処理などを行う通信部分が交通支援アプリケーションを実行する部分よりも優先して実行できるよう実現した。

エッジサーバ上で実行されるアプリケーションは交差点調停や合流支援など様々であり、我々はこれらのアプリケーションについても実装と評価を行っている。しかし、本研究はレーンセクション ID によるエッジサーバ割当てについて提案しているため、アプリケーション処理を簡潔なものとした。エッジサーバ上で実行されるアプリケーションは、受信した車両データから位置情報を参照し、エッジサーバが管轄する範囲の車両情報を処理結果として通知するものとした。

それぞれのシステムについて、様々なパラメータを調整し、preQとrcvQに格納されているデータ量を計測することで、処理遅延が発生した場合に原因を調査する。また、エッジサーバが車両データを受信した時刻 (t1) とそのデータがアプリケーションでの処理が完了した時刻 (t2) の差を計測することで、処理遅延時間を評価する。

評価に用いたクラウド, エッジサーバとなる PC の構成を表 2 に示す。車両は 5G や LTE などの無線通信を用いてダイナミックマップと通信すると考えられ、我々も LTE や Wi-Fi を用いたダイナミックマップの実証実験を行っている。しかし、無線通信では我々の提案するシステム側の要因だけでなく、通信条件に大きく依存する。昨今、無線ネットワークの研究がさかんに行われ、高速かつ高信頼な通信方式が生み出されつつある。我々はそのような技術を柔軟に用いて、統合的に車両を管理するためのダイナミックマッププラットフォームを構築しており、エッジサーバを用いて負荷分散を実現するためにレーンセクション ID を提案している。そのため、レーンセクション ID のスケラビリティへの貢献度をより明確にするため、無線通信の不確定要因を減らし、本シミュレーションでは有線接続によるネットワーク環境を構築した。また、一般的にエッジサーバは分散配置され、集中管理型のクラウドに比べて処理性能が劣ることを想定し、エッジサーバとなる PC の CPU をリソース制限 [41] し、性能を調整した。クラウドとエッジサーバについて CPU ベンチマーク [42] で測定した結果を表 3 に示す。

評価にあたり、シミュレーション環境の基本構成を図 12

表 3 ベンチマーク

Table 3 Cloud and edge server benchmark.

サーバ	ベンチマークスコア
クラウド	8,650
エッジサーバ	6,050

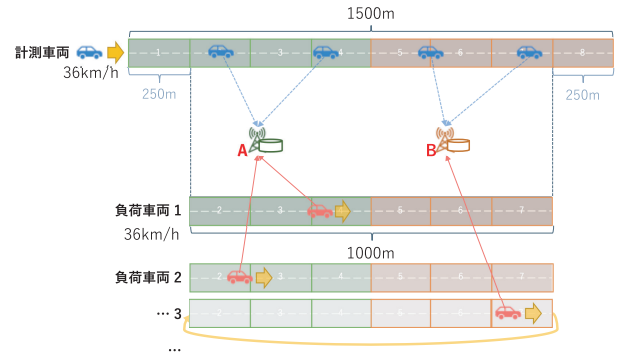


図 12 シミュレーションに用いた道路環境

Fig. 12 Road environment used in the simulation.

表 4 評価システム構成と送信パラメータ (計測車両)

Table 4 Vehicle configuration and transmission parameters.

計測車両	
OS	Ubuntu16.04
CPU	4 コア 8 スレッド (1.90 GHz)
メモリ	16 GB
SSD	256 GB
通信方式	有線 LAN (最大 1 Gbps)
送信データパラメータ	
再送	なし
同時送信	なし
送信間隔	100 ms
計測間隔	1,000 ms
送信時間	150 s
データサイズ	1,158 Byte

に示す。また、計測車両に用いた PC の構成とデータの送信パラメータを表 4 に示す。計測車両以外の車両データを送信するための負荷車両用の PC の構成とデータの送信パラメータを表 5 に示す。計測対象の車両が走行する道路は長さ 1,500 m の直線道路とし、図 12 内の左端から時速 36 km で 150 秒間かけて右端まで走行するものとする。道路には 8 つのレーンセクション ID が割り当てられており、1,500 m の道路を 2 台のエッジサーバで均等に分割し、各範囲を管轄する。エッジサーバの管轄エリアと受信エリアは、道路の中央を境界として、750 m ずつ割り当てられている。また、負荷車両は 1,500 m の道路の中央 1,000 m を時速 36 km で 100 秒間かけて走行するものとし、全負荷車両のスタート位置はランダムで決定する。しかし、負荷車両からのデータを 100 秒間送信し評価を行うため、負荷車両は右端まで走行すると、その後左端から走行を続け、走行開始から 100 秒が経過すると走行を終了するものとし

表 5 評価システム構成と送信パラメータ (負荷車両)

Table 5 Loading configuration and transmission parameters.

負荷車両	
OS	Ubuntu16.04
CPU	8 コア 16 スレッド (3.60 GHz)
メモリ	16 GB
SSD	256 GB
通信方式	有線 LAN (最大 1 Gbps)
送信データパラメータ	
再送	なし
同時送信	なし
送信間隔	100 ms
送信時間	100 s
データサイズ	1,158 Byte

た。また、これらのパラメータは基本的な構成であり、各パラメータを調整し評価を行うことでレーンセクション ID に基づくエッジサーバ割当ての有効性を検討する。また、我々は再送や複数経路通信による同時送信機能を検討しており、これらの機能を用いることで通信の信頼性の向上を図ることができるが、本研究ではレーンセクション ID に基づくエッジサーバ割当てについて議論するため、それらの機能は用いていない。また、車両のデータ送信間隔は 100 ms 間隔で設定し、車両から送信されるデータは位置情報や速度などのペイロードを含めた 1,158 Byte である。

5. 評価結果・考察

5.1 各システムのスケラビリティ

クラウドによるダイナミックマップシステム、レーンセクション ID を用いないエッジサーバ利用のダイナミックマップシステム、レーンセクション ID を用いたエッジサーバ利用のダイナミックマップシステムのスケラビリティを評価した。基本的なシミュレーション環境は 4 章で示した構成であり、図 13 に示すように、クラウドによるダイナミックマップシステムでは、道路上のすべてのレーンセクション ID (LID) を走行する車両がクラウドに車両データを送信する。LID を用いないエッジサーバ利用のダイナミックマップシステムでは、車両データは最寄りのエッジサーバにデータを送信するが、エッジサーバはその車両を管轄するエッジサーバが自身かどうか判断できないため、データをクラウドに送信しクラウド上のアプリケーションで処理が行われる。

評価結果を図 14 に示す。縦軸は処理遅延が発生しない最大車両台数を示している。クラウドによるダイナミックマップシステムでは、車両台数 1,630 台程度がサーバにデータを送信しても処理遅延は発生しなかった。また、LID を用いないエッジサーバ利用のダイナミックマップシステムでは、車両データを受信したエッジサーバはクラウドに転送し、クラウド上のアプリケーションで実行される

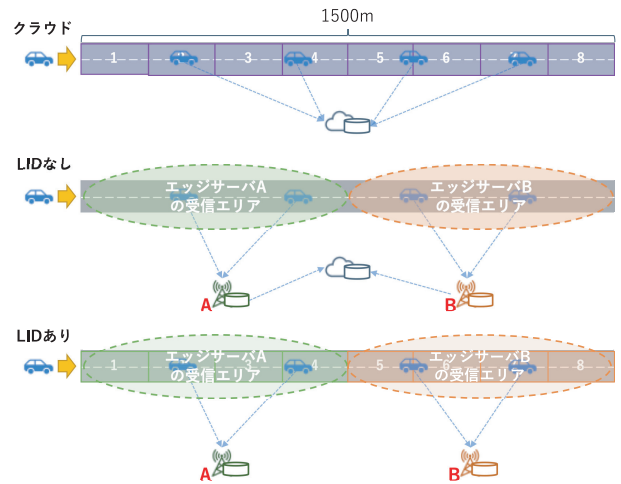


図 13 各ダイナミックマップシステムにおける道路環境
Fig. 13 Road environment in each dynamic map system.

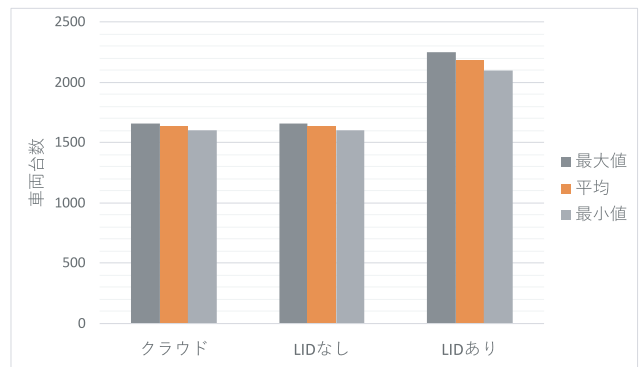


図 14 各ダイナミックマップシステムにおけるスケラビリティ
Fig. 14 Scalability in each dynamic map system.

ため、先ほどのクラウドによるダイナミックマップシステムと同じ 1,630 台程度の車両を処理できた。しかし、LID を用いたエッジサーバ利用のダイナミックマップシステムでは、車両データを 2 台のエッジサーバで負荷分散し処理を行うため、クラウドに比べて処理性能が劣るエッジサーバであっても 2,180 台程度の車両を処理することができた。LID を用いたエッジサーバ利用のダイナミックマップシステムが、他の 2 つのシステムに比べて評価結果にバラツキがあるのは、負荷車両がシミュレーション環境上のランダムな位置に発生するため、発生位置によって片方のエッジサーバに一時的に負荷が偏ることがあるためである。

また、各システムにおけるパケット到達率を表 6 に示す。各システムにおいて同程度のパケット到達率であり、エッジサーバ間で転送を行うことによるパケットロスや、キャッシュミスなどの影響は非常に小さいと考えられる。

また、LID を用いたエッジサーバ利用のダイナミックマップシステムについて、処理遅延が発生しない車両台数と処理遅延が発生する車両台数で、計測車両が送信した各データの処理遅延や、その原因となるエッジサーバのキューサイズ (キューにデータがどれだけ溜まっているか)

表 6 各ダイナミックマップシステムにおけるパケット到達率
Table 6 Packet loss ratio in each dynamic map system.

システム	パケット到達率
クラウド	99.998%
LID なし	99.998%
LID あり	99.997%

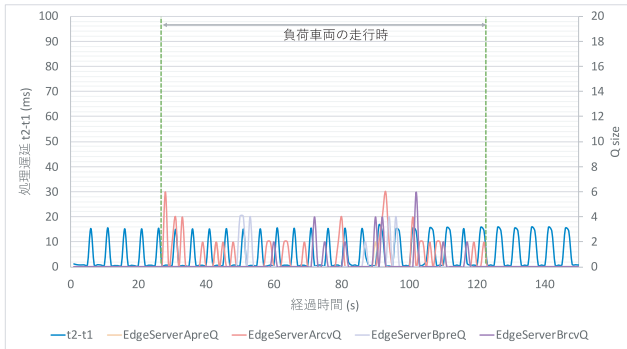


図 15 車両 2,100 台における処理遅延
Fig. 15 Processing delays in 2,100 vehicles.

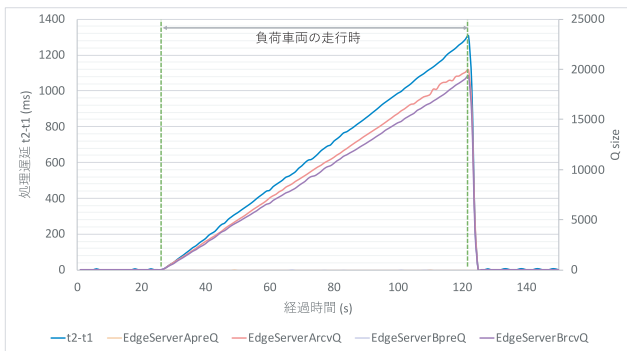


図 16 車両 2,300 台における処理遅延
Fig. 16 Processing delays in 2,300 vehicles.

について評価する。まず、処理遅延が発生しない場合として、車両台数 2,100 台のときの評価結果を図 15 に示す。横軸が経過時間であり、計測車両は 150 秒間かけてシミュレーション内の道路を走行する。また、負荷車両はグラフ内の 2 本の緑色の縦向き点線の範囲内である 100 秒間で道路を走行する。左側の縦軸は計測車両が送信するデータの処理遅延時間を示しており、右側の縦軸は 2 台のエッジサーバのキューサイズを示している。車両台数 2,100 台の場合はキューサイズが大きく増加することなく、大きな処理遅延は発生しなかった。次に、車両台数 2,300 台の場合の評価結果を図 16 に示す。車両台数 2,300 台の場合、負荷車両が走行を開始し、データを送信し始めると、アプリケーションの処理が追いつかず、2 台のエッジサーバの rcvQ にデータが蓄積され、計測車両が送信したデータの処理遅延が発生した。ここで、2 台のエッジサーバの preQ は増加せず、rcvQ のみが増加したのは、preQ はあくまで、エッジサーバが受信したデータを、転送するか自身のアプリケーションに送信するかを判断するために保持するもの

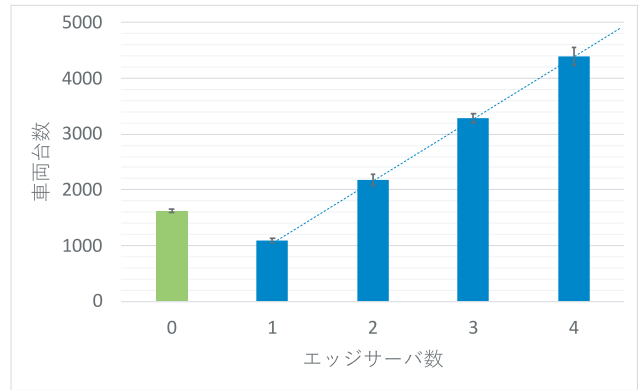


図 17 エッジサーバ数のスケーラビリティへの影響
Fig. 17 Scalability by number of edge servers.

であり、この 2 つのキューが独立して動作しているからで、エッジサーバ内の転送機能とアプリケーションを独立して実行することが可能である。

5.2 エッジサーバ数のスケーラビリティへの影響

シミュレーション上の道路を管轄するエッジサーバ数を変化させてスケーラビリティへの影響を評価した。基本的なシミュレーション環境は 4 章で示した構成であり、本評価では負荷車両が走行する 1,000 m の範囲の道路を、設置したエッジサーバ数で均等に分割し各エッジサーバが管轄するものとした。また負荷車両は、計測車両が走行する 1,000 m の範囲の両側 250 m も走行するが、その範囲は負荷車両の走行範囲を管轄するエッジサーバの両端のエッジサーバが管轄するものとした。レーンセクション ID は、図 12 と同様に、各エッジサーバが管轄する道路を 4 つに分割し割り当てた。

評価結果を図 17 に示す。まずエッジサーバが 0 台の場合、車両が送信したデータはクラウドへ送信され、クラウドのアプリケーションで実行されるため、図 14 のクラウドによるダイナミックマップシステムと同様に 1,630 台程度の車両を処理できた。エッジサーバを 1 台以上配置した場合、エッジサーバ 1 台あたり 1,110 台程度の車両を処理することができ、エッジサーバの台数を増やすことでスケーラビリティが向上した。

エッジサーバは各携帯電話基地局の周辺に配置することを想定しており、これらの基地局は約 1 km 四方の範囲をカバーする [43]。また、日本における車両密度は最大で約 1,000 台/km 四方である [44]。車両密度が高くなる都心部などでは、携帯電話基地局の配置間隔が狭くなり、携帯電話基地局周辺に配置されるエッジサーバ 1 台あたり 1,000 台程度の車両をカバーする必要があると想定される。本研究で実現したレーンセクション ID を用いてエッジサーバを割り当てたダイナミックマップシステムによって、クラウドに比べて処理性能が劣るコンピュータであってもスケーラビリティが向上すると考えられる。

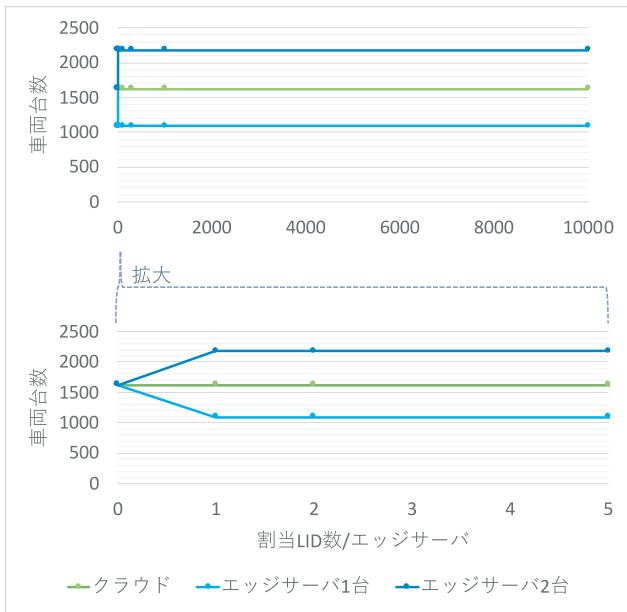


図 18 LID 数のスケーラビリティへの影響
Fig. 18 Scalability by number of LID.

5.3 レーンセクション ID 数によるスケーラビリティへの影響

各エッジサーバに割り当てられるレーンセクション ID 数を変化させてスケーラビリティを評価した。基本的なシミュレーション環境は 4 章で示した構成であり、2 台のエッジサーバがそれぞれ管轄する 750 m に割り当てるレーンセクション ID 数を調整する。評価結果を図 18 に示す。2 つのグラフが示すのは同じであるが、下のグラフは、横軸である割り当てられるレーンセクション ID 数が非常に小さい場合について拡大したものである。レーンセクション ID を 1 つ以上割り当てた場合、レーンセクション ID にかかわらず処理可能な車両台数に変化はなかった。レーンセクション ID を 10,000 個割り当てた場合でも、オーバヘッドが大きくなり処理遅延が発生することはなかった。また、割り当てられるレーンセクション数が 0 個の場合は、図 14 のレーンセクション ID を用いないエッジサーバ利用のダイナミックマップシステムと同じであるため、エッジサーバ数を変化させたとしてもクラウドによるダイナミックマップシステムと同等の 1,630 台程度が処理可能な最大車両台数となった。エッジサーバは携帯電話基地局周辺に配置することを想定しており、レーンセクション ID は、車両位置とその車両を管轄するエッジサーバを関係付けるものであるため、この程度のレーンセクション ID 数をカバーできていることから、レーンセクション ID によるエッジサーバ割当ての有効性を示している。

5.4 エッジサーバの処理能力によるスケーラビリティへの影響

配置するエッジサーバの処理能力を調整し、スケーラビ

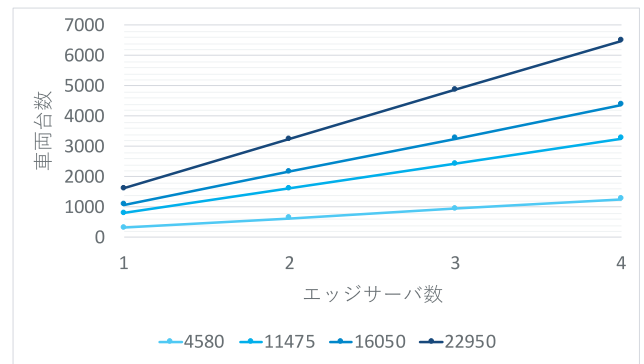


図 19 エッジサーバの処理能力によるスケーラビリティへの影響
Fig. 19 Scalability of edge servers by processor capacity.

リティへの影響を評価した。基本的なシミュレーション環境は 4 章で示した構成であり、5.2 節と同様に、エッジサーバ数に対応してレーンセクション ID を割り当て、エッジサーバの処理能力を調整して評価を行った。エッジサーバの処理能力はエッジサーバに用いた PC の CPU のリソースを制限 [41] し、CPU ベンチマーク [42] で測定した。評価結果を図 19 に示す。グラフの凡例に記載する数値は CPU ベンチマークで測定したスコアであり、数値が大きいほど処理能力が大きいことを示している。エッジサーバの処理能力が大きく、エッジサーバ数が多いほど処理可能な車両台数も増加するが、処理能力が低いエッジサーバであっても、配置する台数を増やすことでスケーラビリティが向上した。

5.5 車両速度によるスケーラビリティへの影響

シミュレーション上の負荷車両の車両速度を変化させてスケーラビリティへの影響を評価した。基本的なシミュレーション環境は 4 章で示した構成であり、負荷車両の速度が固定の場合と、車両速度が変化する場合について評価を行った。負荷車両は、車両速度が固定の場合は指定した速度で、変化する場合は指定した範囲内で滑らかに速度変化しながら走行する。本評価では、負荷車両は走行距離にかかわらず 100 秒間走行する。また、車両速度が変化する場合、車両の発生位置に加えて、車両速度も各車両がランダムに変化するものとした。評価結果を図 20 に示す。車両速度が可変の場合、一定の場合に比べて処理可能な車両台数の誤差が大きくなった。これは、車両速度がランダムに変化するため、1 つのエッジサーバが管轄するエリアに車両が集中したためである。つまり、車両速度によるスケーラビリティへの影響はなく、提案手法における処理可能な台数は、エッジサーバが管轄するエリアに存在する車両台数によって決定される。

5.6 レーンセクション ID 転送機能の評価

3 章で述べたように、我々はレーンセクション ID を用い

表 7 道路環境による LID 転送と処理遅延への影響

Table 7 Processing delay and LID transfer by road environment.

No	管轄エリアの範囲		受信エリアの範囲		車両台数	処理遅延	キュー (エッジ A)		キュー (エッジ B)	
	エッジ A	エッジ B	エッジ A	エッジ B			preQ	rcvQ	preQ	rcvQ
1	500 m	500 m	500 m	500 m	2,100 台	-	-	-	-	-
2	500 m	500 m	500 m	500 m	2,200 台	発生	-	増加	-	増加
3	500 m	500 m	400 m	600 m	2,100 台	-	-	-	-	-
4	500 m	500 m	400 m	600 m	2,200 台	発生	-	増加	-	増加
5	500 m	500 m	0 m	1,000 m	2,100 台	-	-	-	-	-
6	500 m	500 m	0 m	1,000 m	2,200 台	発生	-	増加	-	増加
7	400 m	600 m	500 m	500 m	2,100 台	発生	-	-	-	増加
8	400 m	600 m	400 m	600 m	2,100 台	発生	-	-	-	増加
9	400 m	600 m	500 m	500 m	1,700 台	-	-	-	-	-
10	400 m	600 m	600 m	400 m	2,100 台	発生	-	-	-	増加
11	400 m	600 m	600 m	400 m	1,700 台	-	-	-	-	-
12	400 m	600 m	1,000 m	0 m	2,100 台	発生	-	-	-	増加

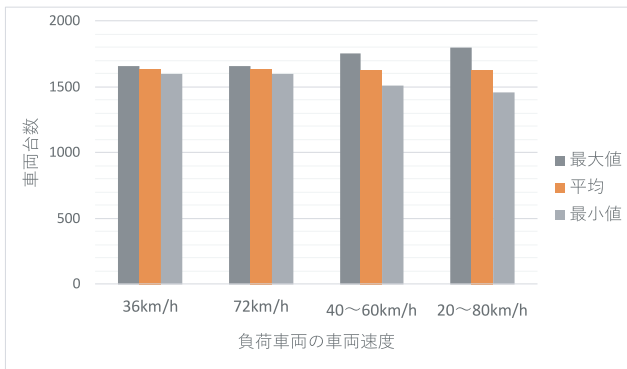


図 20 車両速度のスケラビリティへの影響
Fig. 20 Scalability by vehicle speed.

ることで電波状況などに影響されることなく、車両とエッジサーバを関係付ける転送機能を実現した。そこで、実際にデータ転送が起こりうる状況を想定し、スケラビリティへの影響を評価した。基本的なシミュレーション環境は 4 章で示した構成であり、シミュレーション上の負荷車両が走行する道路の管轄エリアと受信エリアを変化させて評価を行った。まず、図 21 に示すように、道路上を四角の枠線で囲い、番号が割り当てられているのがレーンセクション ID に基づくエッジサーバの管轄エリアである。四角で囲まれた範囲内にいる車両は送信先のエッジサーバに関係なく、その車両位置を管轄するエッジサーバに転送され、そのエッジサーバ上のアプリケーションで処理される。また、点線の楕円形で囲まれた範囲がエッジサーバの受信エリアである。つまり、楕円形の範囲内にいる車両にとっての最寄りのエッジサーバであり、車両が送信したデータはそのエッジサーバが受信する。しかし、これは通信方式や通信条件に大きく依存するため、レーンセクション ID と管轄エリアを用いて車両とエッジサーバ間の連携を実現している。

本評価では、エッジサーバの管轄エリアと受信エリア、

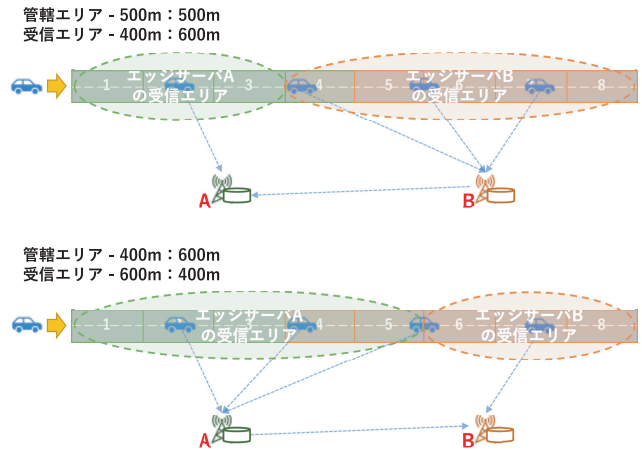


図 21 LID 転送時における道路環境

Fig. 21 Road environment at the time of LID transfer.

また車両台数によって処理遅延が発生するか、またその処理遅延の原因となるキューサイズについて調査した。表 7 に示すように、エッジサーバの管轄エリアが均等に 500 m ずつ割り当てられている場合、受信エリアの割当てにかかわらず車両台数 2,100 台程度では処理遅延は発生せず、それ以上の車両台数で処理遅延が発生した。またこのとき、キューサイズは 2 台のエッジサーバにおいて rcvQ が増加した。

エッジサーバの管轄エリアを、それぞれ 400 m と 600 m の長さで割り当てた場合、受信エリアの割当てにかかわらず、車両台数 1,700 台程度までは処理遅延は発生せず、それ以上の場合で処理遅延が発生した。またこのとき、キューサイズはエッジサーバ B の rcvQ のみが増加した。ここで、処理遅延が発生しない最大車両台数が 1,700 台程度であった理由は、エッジサーバの管轄エリアが 4 : 6 の比で割り当てられ、負荷車両はランダムな位置に発生するため、1,700 台の負荷車両の 60% である約 1,000 台程度がエッジサーバ B で処理する必要があり、図 17 で示すようにエッジサー

バ1台あたりの処理可能な最大車両台数であるからだと考えられる。そのため、エッジサーバBにおいてアプリケーション処理が追いつかなくなり、エッジサーバBのrcvQが増加した。

また、表7のNo.12から分かるように、エッジサーバAの処理能力を大幅に上回る車両台数のデータを受信したとしても、実際に管轄する車両台数がそれを超えていない限り、キューサイズの増加は発生せず、エッジサーバBのrcvQのみが増加している。このことから、処理遅延はエッジサーバの管轄エリアに位置する車両台数によって決定されることが示された。

これらの結果から、エッジサーバに割り当てられる受信エリアに関係なく、管轄エリアによってスケーラビリティが決定されることが示された。つまり、電波状況や道路状況などにより、エッジサーバの処理能力を大幅に上回る車両台数の車両データを受信したとしても、レーンセクションIDに基づいて実際にアプリケーションを実行するエッジサーバにデータ転送できる連携機能を実現した。

また、これらはアプリケーションの負荷によってクラウド・エッジサーバで処理遅延が発生している。そこで、アプリケーション処理を外し、エッジサーバ間の転送機能そのものによる遅延を測定した。その結果、各システムにおいて管理する合計車両台数が10,000台程度まではキューサイズの増加や処理遅延は発生しなかった。しかし、車両台数10,000台程度を超えるとパケットロスが発生し、それ以上の車両台数を管理することはできなかった。これは、車両台数が増加したことにより通信帯域が逼迫し、1Gbpsを超えたためだと考えられる。本研究ではそれ以上の車両台数の評価はできなかったものの、車両台数10,000台程度までを転送による遅延なく管理することができた。これらより、エッジサーバ間の転送によるオーバーヘッドはきわめて小さく、ダイナミックマップシステムのスケーラビリティへの影響は非常に小さいと考えられる。

6. まとめ

近年、自動運転車両に搭載されたセンサ情報を無線通信経路で共有し安全性と効率を目指した協調型自動運転の研究が始まっている。さらに、共有したセンサ情報を管理してアプリケーションを実行するための情報通信プラットフォームであるダイナミックマップシステムが検討されている。しかし、インターネット上のクラウドで動作するダイナミックマップシステムでは、センサ情報を送受信する車両台数が増加した場合、スケーラビリティに関しての懸念がある。そこで、クラウドで管理している情報を地理的に分散配置したエッジサーバにおいて管理することで、アプリケーションを効率的に実行可能になると考えられる。

本稿では、車両が走行する道路上のエリアを「レーンセクションID」として分割し、それに基づいたIDを用いて

エッジサーバを割り当てるダイナミックマップシステムを実装した。車両とエッジとの通信にはユニキャスト通信、マルチキャスト通信を用い、車両とエッジサーバが効率的に通信することを可能とした。また、電波状況などから意図しないエッジサーバがデータを受信した際に、レーンセクションID転送を用いることで、車両がエッジサーバ間をまたいで高速に移動しても、低遅延でエッジサーバと車両が通信を行い、処理が可能なシステムを構築した。これにより、電波状況や交通環境に左右されず、膨大な車両を分散配置したエッジサーバで低遅延に処理することが可能となる。5GやLTEなどの通信方式にも柔軟に対応でき、携帯電話基地局の受信範囲程度の車両をカバーできる。

また、安全運転支援や自動運転を実現するためのダイナミックマップシステムでは、低遅延で通信を行う必要があり、今後車両とサーバが通信するデータ量はますます増えていくと考えられるため許容車両台数は多いほどよい。車両が走行する道路を想定し、エッジサーバの管轄エリアと受信エリアを設定したシミュレーション環境を構築し、様々なパラメータを変化させてスケーラビリティへの影響を評価した。その結果、クラウドによるダイナミックマップシステムや、レーンセクションIDを用いないダイナミックマップシステムに比べて低遅延で通信し、処理が可能となり、スケーラビリティが向上した。本システムを用いてエッジサーバをより多く配置することで許容車両台数はさらに増加すると考えられ、エッジサーバ割当て方式の有効性を示した。

謝辞 本研究の一部はJSPS科研費JP20H00589の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] 高橋 宏：ドライバを支援する車の知能化技術，養賢堂(2013).
- [2] 菅沼直樹，米陀佳祐：自動車の自動運転におけるデジタル地図の活用，日本ロボット学会誌，Vol.33，No.10，pp.760–765 (2015).
- [3] 徳永雄一：「ダイナミックマップによる社会IoTの実現とその活用」特集号を企画して，システム/制御/情報，Vol.60，No.11，p.495 (2016).
- [4] Baber, J., Kolodko, J., Noel, T., Parent, M. and Vlacic, L.: Cooperative autonomous driving: Intelligent vehicles sharing city roads, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol.12, No.1, pp.44–49 (2005).
- [5] 青木啓二：自動運転車の開発動向と技術課題：2020年の自動化実現を目指して，情報管理，Vol.60，No.4，pp.229–239 (2017).
- [6] 菅沼直樹：自動車の自動運転技術の動向と開発事例，電子情報通信学会誌，Vol.98，No.1，pp.48–53 (2015).
- [7] Hobert, L., Festag, A., Llatser, I., Altomare, L., Visintainer, F. and Kovacs, A.: Enhancements of V2X communication in support of cooperative autonomous driving, *IEEE Communications Magazine*, Vol.53, No.12, pp.64–70 (2015).
- [8] Zhang, J., Wang, F.-Y., Wang, K., Lin, W.-H., Xu, X. and Chen, C.: Data-Driven Intelligent Transporta-

- tion Systems: A Survey, *IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems*, Vol.12, No.4, pp.1624–1639 (2011).
- [9] ETSI: Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service, Technical Report, EN 302 637-2 V1.4.1 (2019).
- [10] 首相官邸：官民 ITS 構想・ロードマップ 2019, 高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部・官民データ活用推進戦略会議 (オンライン), 入手先 (<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/20190607/siryu9.pdf>) (参照 2021-02-03).
- [11] Dimitrakopoulos, G. and Demestichas, P.: Intelligent Transportation Systems, *IEEE Vehicular Technology Magazine*, Vol.5, No.1, pp.77–84 (2010).
- [12] Lee, J. and Park, B.: Development and Evaluation of a Cooperative Vehicle Intersection Control Algorithm Under the Connected Vehicles Environment, *IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems*, Vol.13, No.1, pp.81–90 (2012).
- [13] 高田広章, 佐藤健哉：ダイナミックマップ：自動走行/協調運転支援のための情報プラットフォーム, システム/制御/情報, Vol.60, No.11, pp.457–462 (2016).
- [14] 名古屋大学大学院情報学研究科附属組込みシステム研究センター：ダイナミックマップ 2.0 の高信頼化技術に関するコンソーシアム (オンライン), 入手先 (<http://www.nces.i.nagoya-u.ac.jp/ddm2/>) (参照 2021-02-03).
- [15] Varga, N., Bokor, L. and Fischer, H.-J.: LDM-based dynamic network discovery and selection for IPv6 mobility management optimization in C-ITS environments, *2015 International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS)*, pp.483–490 (2015).
- [16] 佐藤健哉, 渡辺陽介, 高田広章：動的地理情報共有のためのアプリケーションプラットフォームとしてのダイナミックマップの役割, 電子情報通信学会誌, Vol.101, No.1, pp.85–90 (2018).
- [17] 山本俊行, Liu, K., 森川高行：タクシー配車データのプローブ情報としての活用に関する基礎的分析, 土木計画学研究論文集, Vol.23, No.4, pp.863–870 (2006).
- [18] Steven, S. and Thomas, K.: Traffic Probe Data Processing for Full-Scale Deployment of Vehicle-Infrastructure Integration, *Transportation Research Record*, Vol.2086, No.1, pp.115–123 (2008).
- [19] Jaworski, P., Edwards, T., Moore, J. and Burnham, K.: Cloud computing concept for Intelligent Transportation Systems, *2011 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pp.391–936 (2011).
- [20] 株式会社 NTT ドコモ, 株式会社 パスコ：高度地図データベースの効率的な更新・配信の実現について (オンライン), 入手先 (https://smartiot-forum.jp/application/files/6414/7702/6769/sympo_20160927_02_mobility_03-03.pdf) (参照 2021-02-03).
- [21] Mao, Y., You, C., Zhang, J., Huang, K. and Letaief, K.B.: A Survey on Mobile Edge Computing: The Communication Perspective, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol.19, No.4, pp.2322–2358 (2017).
- [22] Zhang, K., Mao, Y., Leng, S., He, Y. and Zhang, Y.: Mobile-Edge Computing for Vehicular Networks: A Promising Network Paradigm with Predictive Off-Loading, *IEEE Vehicular Technology Magazine*, Vol.12, No.2, pp.36–44 (2017).
- [23] Zhang, J. and Letaief, K.B.: Mobile Edge Intelligence and Computing for the Internet of Vehicles, *Proc. IEEE*, Vol.108, No.2, pp.246–261 (2020).
- [24] ITS 情報通信システム推進会議セルラーシステム TG：セルラー通信技術を用いた ITS・自動運転の高度化に向けた課題調査報告書, ITS Info-communications (オンライン), 入手先 (https://itsforum.gr.jp/Public/J7Database/p62/Cellula_system_201906.pdf) (参照 2021-02-03).
- [25] Martín-Pérez, J., Cominardi, L., Bernardos, C.J., de la Oliva, A. and Azcorra, A.: Modeling Mobile Edge Computing Deployments for Low Latency Multimedia Services, *IEEE Trans. Broadcasting*, Vol.65, No.2, pp.464–474 (2019).
- [26] Sabella, D., Vaillant, A., Kuure, P., Rauschenbach, U. and Giust, F.: Mobile-Edge Computing Architecture: The role of MEC in the Internet of Things, *IEEE Consumer Electronics Magazine*, Vol.5, No.4, pp.84–91 (2016).
- [27] ETSI: Multi-access Edge Computing (MEC) Study on MEC Support for V2X Use Cases, Technical Report, GR MEC 022 V2.1.1 (2018).
- [28] Corcoran, P. and Datta, S.K.: Mobile-Edge Computing and the Internet of Things for Consumers: Extending cloud computing and services to the edge of the network, *IEEE Consumer Electronics Magazine*, Vol.5, No.4, pp.73–74 (2016).
- [29] Husain, S., Kunz, A., Prasad, A., Samdanis, K. and Song, J.: An overview of standardization efforts for enabling vehicular-to-everything services, *2017 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*, pp.109–114 (2017).
- [30] 高度道路交通システム研究室：プローブデータに関する日米共同研究評価報告書, 国土技術政策総合研究所資料第 820 号 (オンライン), 入手先 (<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryu/tnn/tnn0820.htm>) (参照 2021-02-03).
- [31] Nanthawichit, C., Nakatsuji, T. and Suzuki, H.: Application of Probe-Vehicle Data for Real-Time Traffic-State Estimation and Short-Term Travel-Time Prediction on a Freeway, *Transportation Research Record*, Vol.1855, No.1, pp.49–59 (2003).
- [32] Shladover, S.E. and Kuhn, T.M.: Traffic Probe Data Processing for Full-Scale Deployment of Vehicle-Infrastructure Integration, *Transportation Research Record*, Vol.2086, No.1, pp.115–123 (2008).
- [33] Misra, P. and Enge, P.: Global Positioning System: Signals, Measurements and Performance Second Edition, Global Positioning System (online), available from (<https://www.navtechgps.com/wp-content/uploads/assets/1/7/2500-2.pdf>) (accessed 2021-02-03).
- [34] 洪久奈保, 高橋友和, 井手一郎, 村瀬 洋, 小島祥子, 高橋新：車載レーザスキャナによる距離データマップの構築と高精度自車位置推定, 電子情報通信学会論文誌 D, 情報・システム, Vol.92, No.2, pp.215–225 (2009).
- [35] 西部陽右：欧州を中心とする協調型 ITS の標準化動向について, *Traffic & Business*, Vol.94, pp.26–30 (2010).
- [36] ETSI: Intelligent Transport Systems; Users and Applications Requirements; Part 2: Applications and Facilities Layer Common Data Dictionary, Technical Report, TS 102 894-2 V1.2.1 (2014).
- [37] ETSI: Intelligent Transport Systems; Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specifications of Cooperative Awareness Basic Service, Technical Report, EN 302 637-2 V1.3.2 (2014).
- [38] ETSI: Intelligent Transport Systems; Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 3: Specifications of Decentralized Environmental Notification Basic Service, Technical Report, EN 302 637-3 V1.2.1 (2014).
- [39] Johnson, D.: Reserved IPv6 Subnet Anycast Addresses,

- RFC 2526 (online), available from <https://tools.ietf.org/html/rfc2526> (accessed 2021-02-03).
- [40] Hinden, R.: IPv6 Multicast Address Assignments, RFC 2375 (online), available from <https://tools.ietf.org/html/rfc2375> (accessed 2021-02-03).
- [41] Menage, P.: CGROUPS, The Linux Kernel Archives (online), available from <https://www.kernel.org/doc/Documentation/cgroup-v1/cgroups.txt> (accessed 2021-02-03).
- [42] Poole, J.: Geekbench 5, Primate Labs (online), available from <https://www.geekbench.com/> (accessed 2021-02-03).
- [43] 総務省：携帯電話・全国 BWA に係る電波の利用状況調査の評価結果(オンライン), 入手先 https://www.soumu.go.jp/main_content/000572035.pdf (参照 2021-02-03).
- [44] 先進安全自動車推進検討会：ASV 検討資料, 社団法人自動車工業会(オンライン), 入手先 https://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho.tsusin/policyreports/joho.tsusin/denpa_riyou/pdf/070322.1.s1.pdf (参照 2021-02-03).



細野 航平 (学生会員)

2020 年同志社大学理工学部情報システムデザイン学科卒業。同年同志社大学大学院理工学研究科情報工学専攻修士課程進学。エッジコンピューティングを活用した自動運転車両向け通信プラットフォームの研究に従事。



榎 晶彦

2002 年東京農工大学大学院電子情報工学専攻修士課程修了。2002 年より富士通株式会社ネットワークソリューション事業本部ソフト・サービスビジネス事業部。



渡辺 陽介 (正会員)

2006 年筑波大学大学院システム情報工学研究科コンピュータサイエンス専攻修了。博士(工学)。2014 年より名古屋大学未来社会創造機構特任准教授として、情報統合、データストリーム処理等の研究に従事。電子情報通信学会, ACM, 日本データベース学会各会員。



高田 広章 (正会員)

名古屋大学未来社会創造機構教授。同大学大学院情報学研究科教授・附属組込みシステム研究センター長を兼務。1988 年東京大学大学院理学系研究科情報科学専攻修士課程修了。同専攻助手, 豊橋技術科学大学助教授等を経て, 2003 年より名古屋大学大学院情報科学研究科教授。2014 年より現職。リアルタイム OS, 組込みシステム開発技術等の研究に従事。オープンソースのリアルタイム OS 等を開発する TOPPERS プロジェクトを主宰。博士(理学)。IEEE, ACM, 電子情報通信学会, 日本ソフトウェア科学会, 自動車技術会各会員。本会フェロー。



佐藤 健哉 (正会員)

同志社大学大学院理工学研究科情報工学専攻教授。1986 年大阪大学大学院工学研究科電子工学専攻修士課程修了。同年住友電気工業情報電子研究所入社。1991~1994 年スタンフォード大学計算機科学科客員研究員。2000 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程修了。米国 AMI-C, Inc. チーフテクノロジストを経て, 2004 年より現職。同志社大学モビリティ研究センター長, および名古屋大学大学院情報学研究科附属組込みシステム研究センター特任教授兼務。博士(工学)。IEEE-CS, ACM, 自動車技術会各会員。