

# 自動運転における交通渋滞緩和に向けた IoT エッジ最適化モデルの提案

北上真二<sup>1</sup> 徳永雄一<sup>†1</sup> 白鳥則郎<sup>†2</sup>

**概要:** 地域の交通渋滞を緩和し交通事故を減らすための高度交通システム (ITS) による最適化は, クラウド中心の IoT コンピューティングモデル (CC-IoT モデル) に基づいている. 一方, 自動車運転者の安全性と快適性を向上させるための車両コンピュータ (V/C) による自動運転の最適化は, エッジ中心の IoT コンピューティングモデル (EC-IoT モデル) に基づいている. しかし, 一般に, CC-IoT モデルと EC-IoT モデルとの間にはトレードオフの関係があり, ITS による交通渋滞緩和と V/C による運転者の快適性維持が両立しないケースがある. 本稿では, 効果的な次世代モビリティサービスの実現に向けて, ITS によるクラウド最適化と V/C によるエッジ最適化を均衡させる IoT エッジ最適化モデルを提案する. この最適化モデルでは, 双方の最適化の均衡をパレート最適化問題と扱い, インテリジェントプロトコルによってクラウドとエッジ間でネゴシエーションすることにより, システム全体の均衡最適化を実現する. また, 本稿では, IoT エッジ最適化モデルの原理を評価するためのシミュレーションを行い, 道路の交通渋滞緩和と自動車の目的地早期到達についての要求レベルに応じて, ITS によるクラウド最適化と V/C によるエッジ最適化を均衡させることが可能であることを示す.

## Proposal of IoT Edge Optimization Model for Easing Traffic Congestion in Autonomous Driving

SHINJI KITAGAMI<sup>1</sup>, YUICHI TOKUNAGA<sup>†1</sup>, and NORIO SHIRATORI<sup>†2</sup>

### 1. はじめに

多数のセンサやデバイスをインターネットに直接接続し, 人の介在なしに様々なサービスを提供する IoT システムは, 産業部門, 家庭部門, 社会部門などでの利用が拡大している[1][2]. たとえば, 産業分野や家庭分野では, リモートメンテナンスやホームセキュリティへの適用が進んでいる. また, 社会分野では, エネルギー管理システムやモビリティサービスの高度化が期待されている.

従来からの IoT システムは, クラウドコンピューティングの考え方に基づいたクラウド集中型の IoT コンピューティングモデル (CC-IoT モデル) である[2]. CC-IoT モデルでは, 広範囲に設置されたセンサから収集した様々なデータを利用することによって, システムの最適化を実現する. 高度交通システム (ITS ; Intelligent Transport Systems) は, 地域全体の交通渋滞緩和や交通事故削減などを目的とするため, CC-IoT モデルによる最適化が適している.

一方で, ネットワーク負荷の増大, フィードバック応答の遅延などの CC-IoT モデルの問題を解決するために, 近年, エッジ集中型の IoT コンピューティングモデル (EC-IoT モデル) が提案されている[2][3]. EC-IoT モデルは, そのエッジ領域内の最適化のためにデータ発生源や制御対象に近いエッジサーバや IoT ゲートウェイでデータ処理を行

う. 自動運転やコネクテッドカーへの対応として車両情報を集約し運転車や同乗者の安全性と快適性の向上させるための車両コンピュータ (V/C; Vehicle Computer) による統合制御が EC-IoT モデルによる最適化と考えることができる [5][9].

しかし, 多くの IoT システムにおいては, クラウドによる最適化とエッジによる最適化はトレードオフの関係となる. たとえば, 全ての自動車の V/C が目的地への早期到達を最優先するように自動運転制御を行うと, 地域の交通渋滞が多発する可能性が高くなる[7]. つまり, V/C による最適化コストを最小化すると, ITS による最適化コストが許容範囲に収まらなくなる.

本稿では, 効果的な次世代モビリティサービスの実現に向けて, ITS によるクラウド最適化と V/C によるエッジ最適化を均衡させることにより, 自動運転により交通渋滞を緩和する IoT エッジ最適化モデルを提案する. このモデルでは, クラウド最適化とエッジ最適化の均衡をパレート最適化問題と扱い, インテリジェントプロトコルによってクラウドとエッジ間でネゴシエーションすることにより, システム全体の均衡最適化を実現する. また, 本稿では, IoT エッジ最適化モデルの原理を評価するためのシミュレーションを行い, 道路の交通渋滞緩和と自動車の目的地早期到達についての要求レベルに応じて, ITS によるクラウド最適化と V/C によるエッジ最適化を均衡させることが可能であることを示す.

<sup>1</sup> 福井工業大学      Fukui University of Technology  
<sup>†1</sup> 三菱電機株式会社      Mitsubishi Electric Corporation  
<sup>†2</sup> 中央大学      Chuo University

## 2. クラウド最適化とエッジ最適化

図1に示すように、IoT アーキテクチャはアプリケーションごとの垂直統合型、クラウドによる水平統合型、エッジによる分散型の順に変遷してきた[1][2]。本稿では、水平統合型のIoT アーキテクチャをクラウド集中型IoT コンピューティングモデル (CC-IoT モデル) と呼ぶ。また、分散型のIoT アーキテクチャをエッジ集中型IoT コンピューティングモデル (EC-IoT モデル) と呼ぶ。CC-IoT モデルは、広範囲のセンサから収集した様々なデータを利用することによって、システムの最適化を行う。本稿では、CC-IoT モデルによる最適化をクラウド最適化と呼ぶ。たとえば、エネルギー管理システム (EMS ; Energy Management System) におけるエネルギー需給バランスの最適化や、ITS による交通渋滞緩和の最適化は CC-IoT モデルが適している[6][9]。

しかし、近年、CC-IoT モデルは、ネットワーク負荷の増大やフィードバック制御の遅延などの問題が指摘されている[2][3]。これらの問題を解決するために提案された EC-IoT モデルは、データ発生源や制御対象に近いエッジサーバで処理を行うことによって、建物や自動車などのエッジ領域内の最適化を行う。本稿では、EC-IoT モデルによる最適化をエッジ最適化と呼ぶ。たとえば、EMS の家庭や工場における省エネや快適性維持のための最適化や、自動車運転者の快適性や安全性維持のための V/C による自動運転制御は EC-IoT モデルが適している[9]。

一般に、クラウド最適化とエッジ最適化はトレードオフの関係になる場合が多い。すなわち、クラウド最適化の結果がエッジ最適化の制約条件になる場合がある。また、逆にエッジ最適化の結果がクラウド最適化の制約条件になる場合がある。たとえば、ITS は、クラウド最適化として交通渋滞の緩和のための管理と制御を行う。一方で、自動車の V/C は、エッジ最適化として目的地に早期に到着するための自動運転制御を行う。ここで、V/C によるエッジ最適化を優先すると、交通渋滞が発生し ITS によるクラウド最適化を妨害することになる[7]。すなわち、次世代モビリティサービスにおいては、ITS と V/C が高度に連携し、道路管理者や運転者などのステークホルダの要求に合わせて、クラウド最適化とエッジ最適化を均衡させる必要がある。

## 3. IoT エッジ最適化モデル

### 3.1 基本的な考え方

本稿では、効果的な次世代モビリティサービスを実現するための IoT エッジ最適化モデルを提案する。図2に、IoT エッジ最適化モデルの基本的な考え方を示す。図において、縦軸は ITS によるクラウド最適化のコスト、横軸は V/C によるエッジ最適化のコストを表し、共にゼロに近い方が最適化のレベルが高いものとする。また、それぞれのコストには許容範囲があるものとする。たとえば、ITS によるクラウド最適化については地域の渋滞度に関するコストの許

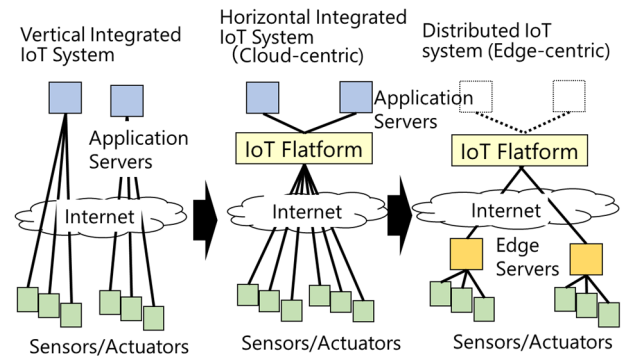


図1 IoT アーキテクチャの変遷  
Figure 1 Transition of IoT Architecture

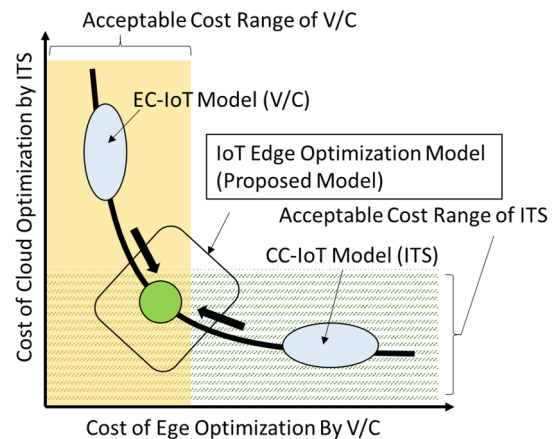


図2 IoT エッジ最適化モデルの基本的な考え方  
Figure 2 Concept of IoT Edge Optimization Model

容範囲が存在し、V/C によるエッジ最適化については自動車運転者快適性に関するコストの許容範囲が存在する。また、図中の曲線はパレート最適曲線であり、ITS によるクラウド最適化を優先した場合は、エッジ最適化のコストが許容範囲に収まらなくなる。逆に、V/C によるエッジ最適化を優先した場合は、クラウド最適化のコストが許容範囲に収まらなくなる。

本稿で提案する IoT エッジ最適化モデルは、クラウド最適化プロセスとエッジ最適化プロセスが、インテリジェントプロトコルによってネゴシエーションすることによって、両方の最適化コストの許容範囲に収まるように、クラウド最適化とエッジ最適化を均衡させる。

### 3.2 定式化

IoT エッジ最適化モデルの定式化を以下に示す。

- クラウド最適化  
 $\text{MIN}_{v_s, v_c} (\text{cost}_c(v_s, v_c)) \text{ under constraints}_c(v_s, v_c)$
- エッジ最適化  
 $\text{MIN}_{v_s, v_e} (\text{cost}_e(v_s, v_e)) \text{ under constraints}_e(v_s, v_e)$
- システム全体の最適化  
 $\text{MIN}_{v_s, v_c, v_e} (\text{cost}_t(v_s, v_c, v_e)) \text{ under constraints}_t(v_s, v_c, v_e)$   
 $\text{cost}_t(v_s, v_c, v_e) = \text{cost}_c(v_s, v_c) + k * \text{cost}_e(v_s, v_e)$

ここで、 $v_c$ ,  $v_e$ ,  $v_s$  は、それぞれクラウド側の変数ベクトル、エッジ側の変数ベクトル、およびクラウドとエッジの共有変数ベクトルである。また、 $cost_e(v_s, v_c)$ ,  $cost_e(v_s, v_e)$ ,  $cost_e(v_s, v_c, v_e)$  は、エッジ最適化、クラウド最適化およびシステム全体の最適化の目的関数であり、アプリケーションごとに定義される。IoT エッジ最適化モデルでは、インテリジェントプロトコルによって共有変数ベクトル  $v_s$  を交換することにより、クラウド最適化、エッジ最適化およびシステム全体の最適化の目的関数を最小にする。

### 3.3 インテリジェントプロトコル

上記に示した定式化において、クラウド側の最適化プロセスのみが参照するクラウド変数ベクトル  $v_c$  はエッジからは参照できない。同様に、エッジ側の最適化プロセスのみが参照するエッジ変数ベクトル  $v_e$  はクラウドからは参照できない。IoT エッジ最適化モデルは、共有変数ベクトル  $v_s$  をクラウドとエッジ間で交換することにより、それぞれの最適化を均衡させる。図3に、共有変数ベクトル  $v_s$  を交換し、双方の最適化プロセス間でネゴシエーションするためのインテリジェントプロトコルを示す。図に示すように、最初に、クラウド最適化コストが最小になる  $v_s$  をエッジに送信する。エッジ側では、エッジ最適化コストが最小になるように  $v_s$  の値を調整してクラウドに返信する。このやり取りを繰り返すことにより、クラウド最適化コスト、エッジ最適化コストおよびシステム全体の最適化コストが最小になるように、それぞれの最適化処理を均衡させる。

### 3.4 次世代モビリティサービスへの適用

第2章で述べたように、効果的な次世代モビリティサービスを実現するためには、ITSによるクラウド最適化とV/Cによるエッジ最適化を均衡させる必要がある。ここで、代表的なクラウド最適化は地域全体の交通渋滞解消であり、一方、代表的なエッジ最適化は、目的地への早期到達による自動車運転者の快適性維持と考えることができる。交通量が少ない場合は、双方の最適化の目的関数を最小にすることは容易であるが、交通量が増加した場合は、クラウド最適化を行うITSとエッジ最適化を行うV/Cの間で、インテリジェントプロトコルによってネゴシエーションすることにより、システム全体の最適化を実現する。

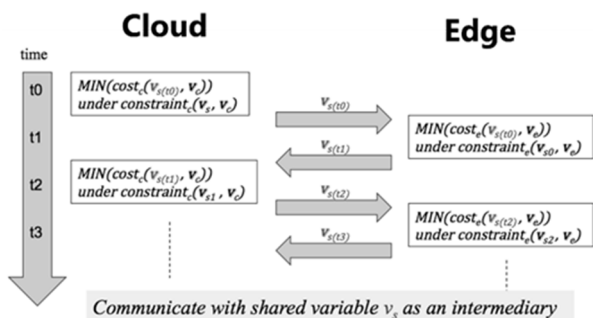


図3 インテリジェントプロトコル

Figure 3 Intelligent Protocol of IoT Edge Optimization Model

## 4. 原理評価シミュレーション

第3章で提案したIoTエッジ最適化モデルの有効性を評価するために、V/Cによる自動運転とITSによる交通渋滞緩和制御の連携を想定した原理検証シミュレーションを行った。なお、本シミュレーションは、R言語のiGraphパッケージ[10]を利用した。

### 4.1 シミュレーションモデル

本シミュレーションでは、図4に示すように、25か所の交差点（ノード）を持つ基盤目の道路（パス）を想定し、4台の車が、それぞれ異なる出発ノードを同時に出発して、目的ノードに最短経路で移動するものとした。V/Cによるエッジ最適化の目的関数はすべての車の移動時間の合計、ITSによるクラウド最適化の目的関数は各ノードのコストの合計値とした。ノード間の移動時間に相当するパスの重みの初期値は、周辺パスは2、それ以外の内部パスは1とした。また、渋滞度に応じてそれぞれのノードにコストを設定し、ノードのコストに応じて、周辺のパスの重みが加算されるものとした。

### 4.2 V/Cによるエッジ最適化

車が出発ノードから目的ノードまで最短移動する経路の決定は、ダイクストラ法によるものとする。その際に、ノードにコスト値が設定されている場合は、その値をノードの周りのパスの重み（移動時間）に加算する。V/Cは、移動経路が決定した段階で各ノードの通過予定時刻（パス重みの累積値）をITSに送信する。

次節で説明するITSによるクラウド最適化の結果として、ITSからノードコスト値が送信されてきた場合は、その値を回りのパスに加えて、最短経路を再計算する。なお、本来であれば、最短経路の再計算は、車が移動している間は継続的に行う必要があるが、本シミュレーションでは、移動を開始する前に最短経路の再計算を行うものとした。

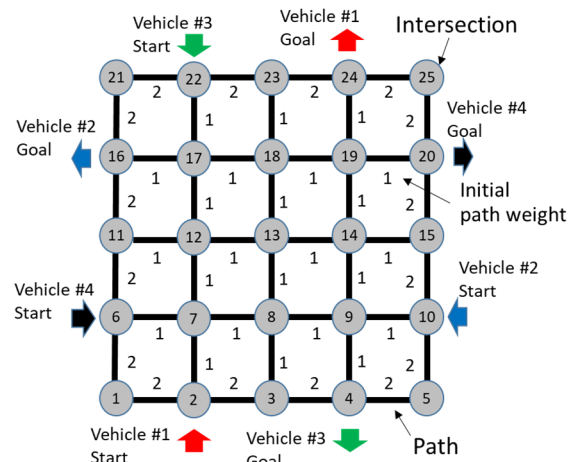


図4 原理評価のためのシミュレーションモデル

Figure 4 Simulation Model for Principle Evaluation

### 4.3 ITSによるクラウド最適化

それぞれの車のV/Cから送信されたノードの通過予定時刻を元に、ノードの渋滞度を計算する。すなわち、あるノードを2台の車が同時に通過する場合は、そのノードのコストを1ポイント加算する。なお、2台以上の車が同時に通過する場合は、同時通過の組み合わせ数をノードコストとして加算する。たとえば、4台の車が同時に通過する場合は、そのノードコストは6となる。すべてのノードについて、ノードコストが計算できた段階で、コストが一番大きいノードのコスト値を、すべての車のV/Cに通知する。ただし、コストが一番大きいノードが複数ある場合は、その中からランダムにノードを選択し、そのノードのコスト値を通知するものとする。

### 4.4 シミュレーション結果

図5～図8に、本シミュレーションの結果を示す。図5は、クラウド最適化のためのノードコストの変化を示す。最適化フェーズ0ではすべてのノードのコストは0であるが、最適化フェーズごとにノードのコストが増加する様子が分かる。

図6は、最適化フェーズ0、4および6における車の移動経路とクラウド最適化コストおよびエッジ最適化コストを示している。たとえば、最適化フェーズ0において、ステップ2の車Bはノード14を通過することを意味する。フェーズ0において、ステップ3ですべての車がノード13を同時に通過することになるため、ノードコストが6(2台の自動車の同時通過の組み合わせ)となる。全体としては、5か所のノードで計10回の同時通過が発生しているため、最適化フェーズ0のクラウド最適化コストは10となった。一方、最適化フェーズ5では、ノードの同時通過は2回のみとなり、クラウド最適化コストは2に改善されている。逆に、各車の移動ステップは6から12に増加したため、エッジ最適化コストは24となった。図7は、最適化フェー

ズ0、4および6における車の移動経路を示したものである(数字はステップを表す)。

図8に、シミュレーションの結果のまとめとして、最適化フェーズ1～8についてのクラウド最適化コストとエッジ最適化コストの関係を示した。図に示すように、クラウド最適化コストを3以下として渋滞ノードを2か所程度になるように最適化すると、エッジ最適化コストが20以上となり、車の移動時間が2倍以上に増加することが分かった。逆に、エッジ最適化コストを10以下になるように最適化すると、クラウド最適化コストが6～10となり、渋滞するノードが多くなることが分かった。また、最適化フェーズ5の状態では、クラウド最適化とエッジ最適化を均衡させると、それぞれのコストが4と16になることが分かった。

## 5. 考察

IoTエッジ最適化モデルは、それを適用するシステムのステークホルダの異なる要求に応じて、クラウド最適化とエッジ最適化を均衡させることができる。エネルギー管理システムにおいては、電力会社やリソースアグリゲータがクラウド側のステークホルダとなり、電力の供給バランスやユニバーサルサービスがクラウド最適化の目的関数となる。一方、エッジ側のステークホルダは、ビル、工場、家庭などの電力需要者となり、省エネ性、快適性などがエッジ最適化の目的関数となる[9]。自動車を中心とした次世代モビリティサービスにおいては、自治体や道路管理事業者がクラウド側のステークホルダ、自動車の運転手がエッジ側のステークホルダとなる。クラウド最適化の目的関数としては、交通渋滞緩和、交通事故削減、CO2排出削減などが考えられるが、本稿では交通渋滞緩和を一義的な目的関数とした。また、エッジ最適化については、自動車の運転手の快適性維持のひとつとして目的地最短到達を一義的な目的関数とした。

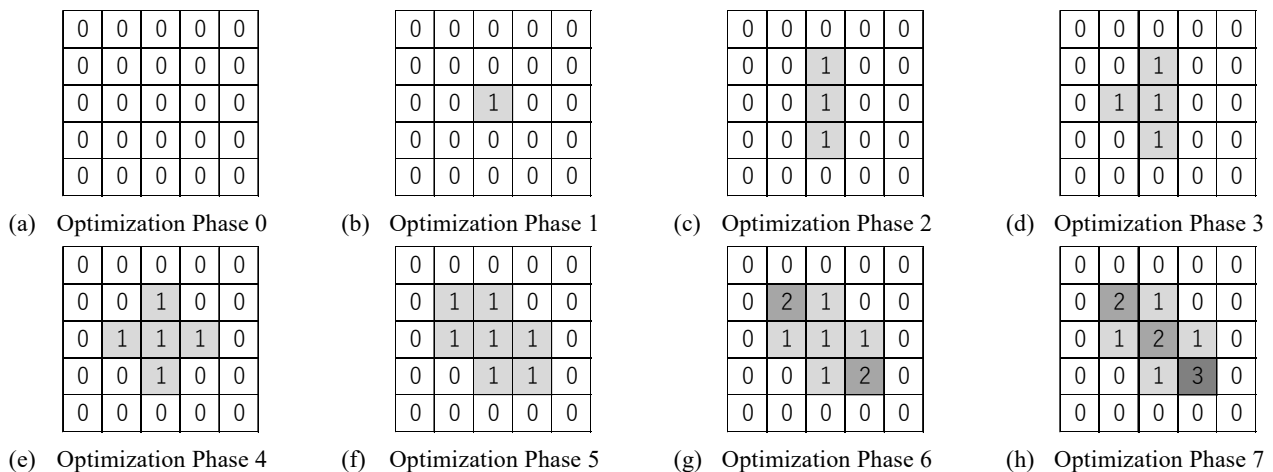


図5 ノードコストの変化

Figure 5 Changes in Node Cost

図 8 のシミュレーション結果に示したように、クラウド側のステークホルダが運用する ITS によるクラウド最適化と、走行する自動車の V/C によるエッジ最適化は、トレードオフの関係にある。本シミュレーションでは、提案方式に基づいてクラウド最適化プロセスとエッジ最適化プロセ

スの間でネゴシエーションさせることで、最適化フェーズ 5 で、両方の最適化を均衡させることができた。実際は、この最適化の均衡状態が妥当であるかどうかは、それぞれのステークホルダの最適化に対する許容範囲に依存するが、提案モデルによって、トレードオフの関係にあるクラウド

Step	A	B	C	D	Collision
0	2	10	22	6	
1	7	9	17	7	1
2	12	14	18	12	1
3	13	13	13	13	6
4	14	18	8	18	1
5	19	17	9	19	1
6	24	16	4	20	
Elapse	6	6	6	6	Cloud Cost
					Edge Cost
			0	10	

Step	A	B	C	D	Collision
0	2	10	22	6	
1	7	9	17	7	1
2					
3	12	8	12	8	2
4					
5	17	7	7	9	1
6	22	6	2	10	
7					
8	23	11	3	15	
9					
10	24	16	4	20	
Elapse	10	10	10	10	Cloud Cost
					Edge Cost
			16	4	

Step	A	B	C	D	Collision
0	2	10	22	6	
1		9	17		
2	3			11	
3		8	12		
4	4			16	
5	9			17	
6		7	7		1
7	14			18	
8		6	2		
9					
10	19	11	3	19	1
11					
12	24	16	4	20	
Elapse	12	12	12	12	Cloud Cost
					Edge Cost
			24	2	

(a) Optimization Phase 0

(b) Optimization Phase 4

(c) Optimization Phase 6

図 6 最適化フェーズ 0/4/6 における車の移動経路  
Figure 6 Moving Path of Vehicle at Optimization Phase 0/4/6

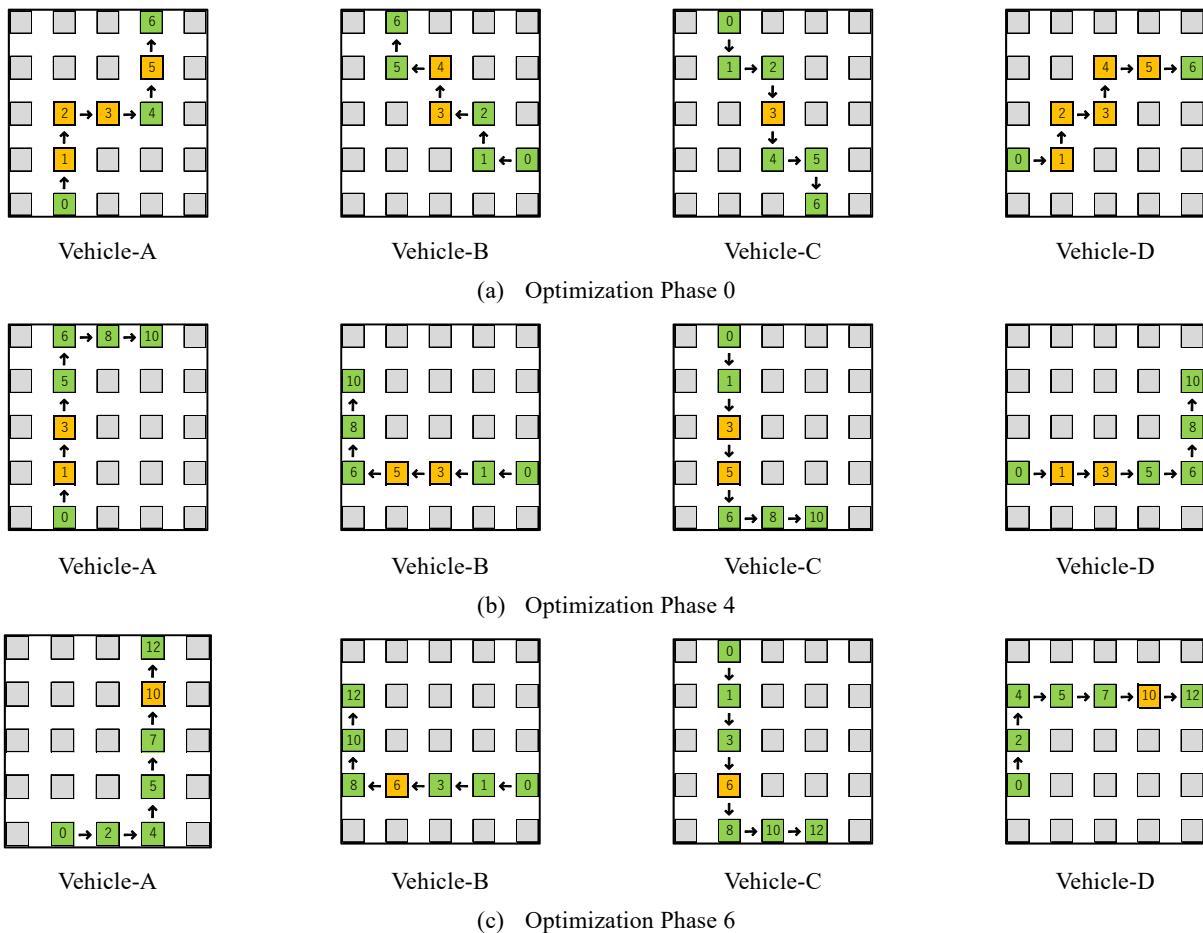


図 7 車の移動経路

Figure 7 Moving Path of Vehicle

最適化とエッジ最適化を様々組み合わせで均衡化させることができることが確認できた。

本稿で示したシミュレーションは、IoT エッジ最適化モデルによる最適化均衡の原理検証を目的としたため、シミュレーションモデルを単純化した。さらに、実際的なシミュレーションを行うためには、自動車の移動開始時間や走行方向の違いなども考慮する必要がある。たとえば、今回のシミュレーションでは、同時にノードを通過する車がある場合に渋滞が発生するものとしてノードコストに反映したが、車が互いに反対方向にすれ違う場合は渋滞としないなどの考慮が必要となる。

## 6. まとめ

自動運転における交通渋滞緩和を目的とし、ITS によるクラウド最適化と V/C によるエッジ最適化を均衡させる IoT エッジ最適化モデルを提案し、そのシミュレーション結果を示した。

今後は、より実際的な環境にあわせて、交通渋滞や運転者の快適性以外の目的関数を組み込んだシミュレーションを行い、IoT エッジ最適化モデルの有効性の評価を進める。また、自動車の移動を考慮した時系列最適化への対応について研究を進める予定である。

**謝辞** 本稿の一部は、東北大学電気通信研究所における共同プロジェクト研究による支援を受けたものである。

## 参考文献

- [1] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, and M. Ayyash, "Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications," *IEEE Communication Surveys & Tutorials*, vol.17, no.4, pp. 2347-2376, Jun. 2015.
- [2] 白鳥則郎, 北上真二, 菅沼拓夫, 菅原研次, 嶋本 薫, "IoT アーキテクチャの最新動向," *電子情報通信学会誌*, vol.100, no.3, pp.214-221, Mar. 2017.
- [3] P.G. Lopez, A. Montresor, D. Epema, A. Datta, T.Higashino, A. Iamnitchi, M. Barcellos, P. Felber, and E.Riviere, "Edge-centric Computing: Vision and Challenges," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 45 issue 5, pp. 37-42, Oct. 2015.
- [4] P. Jitrapitrom, V. Caiati, A-M. Feneri, S. Ebrahimigharehbaghi, M.J.A.González, and Jishnu Narayan, "Mobility as a Service: A Critical Review of Definitions, Assessments of Schemes, and Key Challenges," *Urban Planning: Lisbon*, Vol.2, Issue.2, pp.13-25, June 2017.
- [5] R. Eswaraprasad, and L. Raja, "Improved intelligent transport system for reliable traffic control management by adapting internet of things," *Proc. of 2017 International Conference on Infocom Technologies and Unmanned Systems*, pp.597-601, Dec. 2017.
- [6] T. Sukanuma, T. Oide, S. Kitagami, K. Sugawara, and N. Shiratori, "Multiagent-Based Flexible Edge Computing Architecture for IoT," *IEEE Network*, Vol.21, Issue.1, pp. 16-23, Jan. 2018.
- [7] 和田健太郎, "交通ネットワーク流の安定性と制御," *計測と制御*, Vol.55, Issue.4, pp.368-375, Apr. 2016.

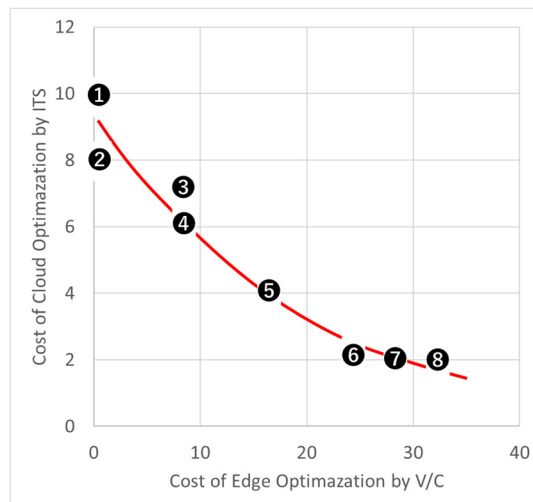


図 8 クラウドとエッジの最適化均衡

Figure 8 Balanced Optimization of Cloud and Edge

- [8] S. Kitagami, T. Ogino, T. Sukanuma and N. Shiratori, "Proposal of A Multi-agent Based Flexible IoT Edge Computing Architecture Harmonizing Its Control with Cloud," 10th International Workshop on Autonomous Self-Organizing Networks, pp.223-pp.229, Nov. 2017.
- [9] 荻野正, 北上真二, 白鳥則郎, "フレキシブル IoT エッジコンピューティングモデルと応用," 第 21 回コンシューマ・デバイス&システム, CDS21-1, Jan.2018.
- [10] Get started with R igraph, <http://igraph.org/r/> (accessed 14 May 2018).