

クラウドとエッジを全体最適化する フレキシブル IoT コンピューティングモデル

北上真二^{†1} 荻野正^{†2} 菅沼拓夫^{†3} 白鳥則郎^{†4}

概要: IoT システムは、システム全体の最適化に適し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) のとエッジ領域内の最適化に適したエッジ集中型の IoT コンピューティングモデル (EC-IoT モデル) に分類することができる。エネルギー管理システムや高度道路交通システムなどの社会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を両立させる必要があるが、これまでに両方の最適化を包含する IoT コンピューティングモデルの検討がなされていない。本稿では、CC-IoT モデルと EC-IoT モデルを融合し、双方の最適化を両立させるフレキシブル IoT コンピューティングモデル (FL-IoT モデル) を提案する。具体的には、IoT システムにおけるクラウド最適化とエッジ最適化はパレート最適化問題と捉えた上で、クラウド最適化、エッジ最適化およびシステム全体最適化の定式化に基づき、最適化のための情報をクラウドとエッジ間で交換するためのインテリジェントプロトコルを提案する。また、さらに、エネルギー管理システムと高度道路交通システムへの FL-IoT モデルの適用の有効性について論じる。

キーワード: クラウド集中型 IoT, エッジ集中型 IoT, パレート最適化, エネルギー管理システム, 高度道路交通システム

Flexible IoT Computing Model for Overall Optimization of Cloud and Edges

SHINJI KITAGAMI^{†1} TADASHI OGINO^{†2}
TAKUO SUGANUMA^{†3} NORIO SHIRATORI^{†4}

Abstract: The IoT system is classified into cloud-centric IoT computing model (CC-IoT model) for optimizing the entire system and edge-centric IoT computing model (EC-IoT model) for optimization within the edge domain. In social systems such as energy management systems and intelligent transportation systems, it is necessary to achieve both optimizations by the cloud and the edges. However, until now, IoT computing models to satisfy both optimizations have not been proposed. In this paper, we propose a flexible IoT computing model (FL-IoT model) that combines the CC-IoT model and the EC-IoT model to achieve optimizations of the cloud and the edges at the same time. In the FL-IoT model, the cloud optimization and the edge optimization in the IoT system are considered as Pareto optimization problem. Under this idea, we propose some formulations for the optimization problem and an intelligent protocol for exchanging information between the cloud optimization and the edge optimization. And we also discuss the usefulness of the FL-IoT model for the energy management system and the intelligent transportation system.

Keywords: Cloud-centric IoT, Edge-centric IoT, Pareto Optimization, Energy Management System, Intelligent Transportation System

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]。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、エネルギー管理やモビリティサービスの高度化が期待できる。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。近年、ネットワーク負荷の増大、フィードバック応答の遅延、プライバシー侵害などの CC-IoT モデルの問題を解決するために、エッジコンピューティングの考え方に基づいたエッジ集中型の 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]。

クラウド集中型の 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ができるため、システムの全体最適化に適している。たとえば、エネルギー管理システムにおけるエネルギー需給の最適化や、高度道路交通システムの交通渋滞緩和のための最適化は CC-IoT モデルが適している。一方、エッジ集中型 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ため、そのエッジ領域内の個別最適化に適している。たとえば、エネルギー管理システムでエッジ側に位置する

^{†1} 福井工業大学
Fukui University of Technology

^{†2} 明星大学
Meisei University

^{†3} 東北大学
Tohoku University

^{†4} 中央大学
Chuo University

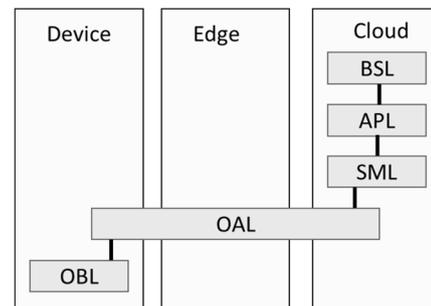
各家庭や工場における省エネや快適性維持の最適化や、高度道路交通システムのエッジ側に位置する自動車の自動運転制御は EC-IoT モデルが適している。一般に、CC-IoT モデルによる最適化と EC-IoT モデルによる最適化はトレードオフの関係にある。すなわち、CC-IoT モデルによる全体最適化がエッジによる個別最適化の制約条件になる場合があり、逆に EC-IoT モデルによる個別最適化がクラウドによる全体最適化の制約条件になる場合がある[5][6]。エネルギー管理や道路交通管理などの社会分野のシステムでは、全体最適化と個別最適化の双方をバランスよく満足させることが求められるが、現時点で両方の最適化を包含する IoT コンピューティングモデルについての研究は見当たらない。

本稿では、CC-IoT モデルと EC-IoT モデルを融合し、双方の最適化を両立させるフレキシブル IoT コンピューティングモデル (FL-IoT モデル) を提案する。具体的には、クラウドによる全体最適化 (クラウド最適化) とエッジによる個別最適化 (エッジ最適化) の関係はパレート最適化問題と捉えた上で、クラウド最適化、エッジ最適化およびシステム全体最適化の定式化を試みる。また、それぞれの最適化のための情報をクラウドとエッジ間で交換するためのインテリジェントプロトコルを提案する。さらに、エネルギー管理システムと高度道路交通システムへの FL-IoT モデルの適用の有効性について論じる。

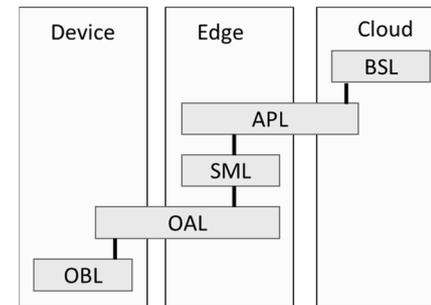
2. IoT コンピューティングモデル

IoT システムのアーキテクチャは、オブジェクト層、オブジェクト抽象化層、サービス管理層、アプリケーション層、およびビジネス層の 5 階層で構成される[1][4]。オブジェクト層は、センサとアクチュエータを含む物理的な層であり、収集したデータをデジタル化し、上位のオブジェクト抽象化層に渡す。オブジェクト抽象化層は、収集したデータをサービス管理層に引き渡すためのネットワーク機能とプロトコル変換機能を含む。サービス管理層は、収集したデータの蓄積と分析およびデバイス管理やサービス登録・発見などの IoT の共通機能を提供する。アプリケーション層とビジネス層は、適用分野毎に、利用者が収集データを可視化・分析して意思決定を行う機能層である。

一方、IoT システムは、デバイス、エッジ、およびクラウドの 3 つの領域から構成される。5 階層 IoT アーキテクチャの各層の機能を、どの領域に配置するかによって、様々なコンピューティングモデルを構成することができる[3][4]。図 1(a)は、ビジネス層、アプリケーション層、およびサービス管理層をクラウドに配置するクラウド集中型の IoT コンピューティングモデル (CC-IoT モデル) である。CC-IoT モデルでは、デバイスやエッジが収集したシステム全体のデータをクラウドのアプリケーションが処理するため、システムの全体最適化を実現することができる。一方、図 1(b)は、アプリケーション層、サービス管理層、および



(a) Cloud-centric IoT Computing Model



(b) Edge-centric IoT Computing Model

BSL: Business Layer, APL: Application Layer,
 SML: Service Management Layer, OAL:
 Object Abstraction Layer, OBL: Object Layer

Fig.1 IoT Computing Model

Table.1 Example of Cloud Optimization and Edge Optimization

	クラウド最適化	エッジ最適化
エネルギー管理システム	<ul style="list-style-type: none"> ・需給バランス ・ユニバーサルサービス 	<ul style="list-style-type: none"> ・快適性・生産性 ・省エネ性
高度道路交通システム	<ul style="list-style-type: none"> ・交通事故減少 ・交通渋滞緩和 	<ul style="list-style-type: none"> ・目的地への早期到着 ・快適性・安全性

オブジェクト抽象化層をエッジ中心に配置するエッジ集中型の IoT コンピューティングモデル (EC-IoT モデル) である。EC-IoT モデルでは、利用できるデータがエッジ領域の範囲に限定されるため、エッジ領域内の部分最適化に適している[6]。

3. クラウド最適化とエッジ最適化

クラウド集中型の 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ができるため、システムの全体最適化に適している。たとえば、エネルギー管理システムにおけるエネルギー需給の最適化や、高度道路交通システムの交通渋滞緩和のための最適化は CC-IoT モデルが適している。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。一方、エッジ集中型 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ため、そのエッジ領域内の個別最適化に適している。たとえば、エネルギー管理システムでエッジ側に位置

する各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、高度道路交通システムのエッジ側に位置する自動車の自動運転制御は EC-IoT モデルが適している。本稿では、CC-IoT モデルによる最適化をエッジ最適化と呼ぶ。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ある[5][6]。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り、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。以下に、エネルギー管理システムと高度道路交通システムについてのクラウド最適化とエッジ最適化の例を示す(表 1)。

(1) エネルギー管理システム

エネルギー管理システムとして、電力供給が逼迫した時に需要家の電力消費を削減することにより電力需給を安定化させる DR (デマンドレスポンス) の導入が検討されている[7]。DR では、RA (リソースアグリゲータ) が電力供給と電力需要が一致するように、需要家の電力消費を抑制する。需要家は、あらかじめ契約した削減量に対する実削減量の割合に応じて報酬金を得る。しかしながら、需要家への太陽光発電や蓄電池の導入が拡大すると、需要家の消費電力の予測が困難になる。また、現在の DR は電力需給バランスの維持や需要家に対するユニバーサルサービスを目的としており、それぞれの需要家における快適性や省エネ性は考慮されない。つまり、RA のクラウドサービスによる電力需給バランスとユニバーサルサービスがクラウド最適化、需要家における快適性や省エネ性の維持がエッジ最適化となる。

(2) 高度道路交通システム

高度道路交通システムでは、交通渋滞の緩和のための管理と制御を行う。一方で、自動車の自動運転/運転支援システムは、目的地への早期到着と運転者の快適性を確保するための制御を行う。すなわち、安心・安全で快適な交通社会を実現するためには、高度道路交通システムと自動運転/運転支援システムの連携が欠かせない。ここで、高度道路交通システムがクラウド、各車両の自動運転/運転支援システムがエッジの位置づけとなり、高度道路交通システムによる交通渋滞の緩和がクラウド最適化、自動運転/運転支援システムによる目的地への早期到着と運転者の快適性確保がエッジ最適化となる。

4. フレキシブル IoT コンピューティングモデル

4.1 基本的な考え方

第3章で述べたように、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ある。すなわち、図2に示すように、CC-IoT モデルはクラウド最適化優先の弱最適解となり、クラウド最適化のコストは許容範囲に収まるがエッジ最適化コストの許容範囲から外れる。逆に、EC-IoT モデルはエッジ最適化優先の弱最適解となり、エッジ最適化のコストは許容範囲に収まるがクラウド最適化コストの許容範囲か

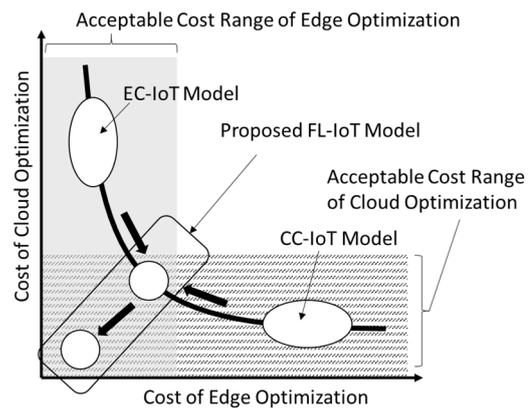


Fig.2 Concept of Flexible IoT Computing Model (FL-IoT)

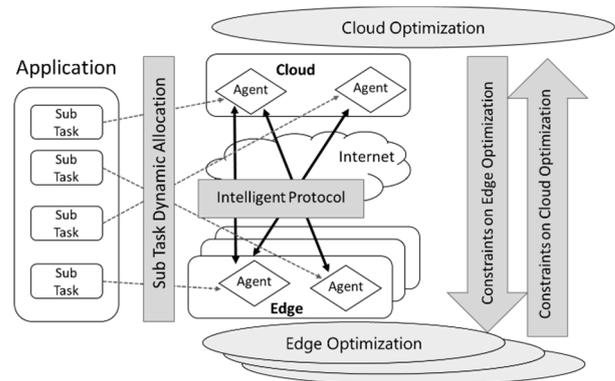


Fig.3 System Configuration of FL-IoT

ら外れる。

本稿で提案するコンピューティングモデルは、クラウド最適化とエッジ最適化のプロセスが協調することによって、両方の最適化コストの許容範囲に収まるパレート最適解を得るように、クラウド最適化とエッジ最適化の制御を調整する。さらに、両方の最適化コストをさらに最小化する理想点に向けて、最適化パラメータを調整する。本稿では、このような最適化を可能とするコンピューティングモデルをフレキシブル IoT コンピューティングモデル (FL-IoT モデル) と呼ぶ。

FL-IoT モデルのシステム構成を図3に示す。図において、アプリケーションは複数のサブタスクから構成され、クラウドまたはエッジにエージェントとして割り当てられる。たとえば、クラウド最適化に係るサブタスクは、クラウドで収集されたすべてのデータにアクセスする必要があるため、クラウドに配置される。また、リアルタイム性が要求されるサブタスクは、低遅延通信を必要とするため、制御対象に近いエッジに割り当てられる。クラウドに配置されたエージェントとエッジに配置されたエージェントは、インテリジェントプロトコルによって、それぞれの最適化のための情報を交換する。

4.2 定式化

FL-IoT モデルでは、システム全体の最適化のために、クラウド最適化とエッジ最適化のプロセス間で情報を交換しながら、システム全体の最適化を行う。この最適化を以下のように定式化する。

- クラウド最適化

$$\text{MIN}_{\mathbf{v}_s, \mathbf{v}_c} (\text{cost}_c(\mathbf{v}_s, \mathbf{v}_c)) \text{ under constraints}_c(\mathbf{v}_s, \mathbf{v}_c)$$

- エッジ最適化

$$\text{MIN}_{\mathbf{v}_s, \mathbf{v}_e} (\text{cost}_e(\mathbf{v}_s, \mathbf{v}_e)) \text{ under constraints}_e(\mathbf{v}_s, \mathbf{v}_e)$$

- システム全体最適化

$$\text{MIN}_{\mathbf{v}_s, \mathbf{v}_c, \mathbf{v}_e} (\text{cost}_t(\mathbf{v}_s, \mathbf{v}_c, \mathbf{v}_e)) \text{ under constraints}_t(\mathbf{v}_s, \mathbf{v}_c, \mathbf{v}_e)$$

$$\text{cost}_t(\mathbf{v}_s, \mathbf{v}_c, \mathbf{v}_e) = \text{cost}_c(\mathbf{v}_s, \mathbf{v}_c) + k * \text{cost}_e(\mathbf{v}_s, \mathbf{v}_e)$$

ここで、 \mathbf{v}_c , \mathbf{v}_e , \mathbf{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、クラウドとエッジの共有変数ベクトルである。また、 $\text{cost}_c(\mathbf{v}_s, \mathbf{v}_c)$, $\text{cost}_e(\mathbf{v}_s, \mathbf{v}_e)$, $\text{cost}_t(\mathbf{v}_s, \mathbf{v}_c, \mathbf{v}_e)$ は、それぞれの最適化のコスト関数であり、アプリケーションごとに定義される。FL-IoT 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 \mathbf{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最適化のコスト関数を最小にする。

4.3 インテリジェントプロトコル

FL-IoT モデルのクラウド変数ベクトル \mathbf{v}_c はエッジ側からは参照できない。同様に、エッジ変数ベクトル \mathbf{v}_e はクラウド側からは参照できない。そこで、FL-IoT モデルでは、共有変数ベクトル \mathbf{v}_s をクラウドとエッジ間で交換する。図4に、共有変数ベクトル \mathbf{v}_s を交換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、クラウド最適化コストが最小になる \mathbf{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 \mathbf{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最適化コストが最小になる \mathbf{v}_s を得る。

5. 適用例

本章では、FL-IoT モデルに基づくエネルギー管理システムの定式化の例と高度道路交通システムへのFL-IoT モデル適用の考え方を示す。

5.1 エネルギー管理システム

FL-IoT モデルを適用するエネルギー管理システムとして、第3章で述べたDRシステムの構成図を図5に示す。DRシステムでは、RA（リソースアグリゲータ）がクラウド、各需要家のEMS（エネルギー管理システム）がエッジとなる。

(1) クラウド最適化

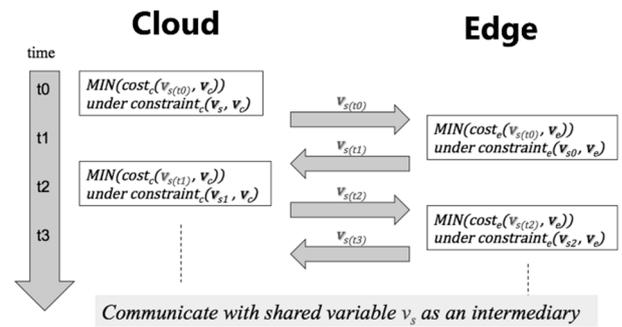


Fig.4 Intelligent Protocol of FL-IoT

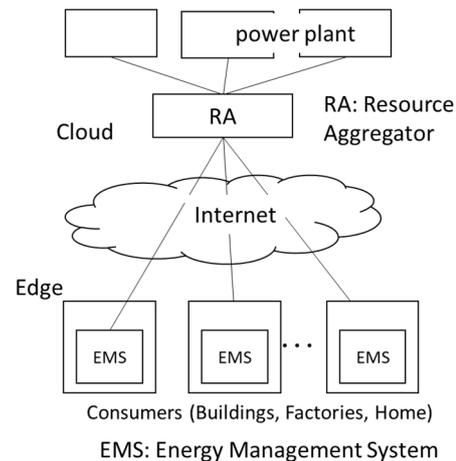


Fig.5 Energy Management System (DR)

エネルギー管理システムにおけるクラウド最適化のコスト関数と制約条件を以下に示す。

- クラウド最適化のコスト関数

$$\text{cost}_c(\mathbf{v}_s, \mathbf{v}_c) = \left| \frac{S(t) - \sum_{k=1}^n D_k(t)}{S(t)} \right| + \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left(\frac{C_k(t)}{R_k} - \overline{CR(t)} \right)^2}$$

- 制約条件

$$C_k(t) \geq 0, D_k(t) \geq 0, R_k(t) \geq 0, S(t) \geq 0$$

ここで、

$S(t)$: 電力供給量

$D_k(t)$: 電力需要家 k の消費電力量

$C_k(t)$: 電力需要家 k に対する電力消費削減要請量

R_k : 電力需要家 k の電力削減契約量

n : 電力需要家の数

クラウド最適化のコスト関数の第1項は、需給バランスに係るコストであり、電力供給と電力需要の差に応じてコストが決定される。つまり、需給バランスが崩れた場合にペナルティのコストが発生する。第2項は、ユニバーサルサービスに係るコストであり、需要家との電力削減契約

量に対する削減実績量の割合の標準偏差である。すなわち、需要家サービスに偏りが発生した場合にペナルティーのコストが発生する。

(2) エッジ最適化

エネルギー管理システムにおけるエッジ最適化のコスト関数と制約条件を以下に示す。

- エッジ最適化のコスト関数

$$\begin{aligned} cost_e(\mathbf{v}_s, \mathbf{v}_e) = & \sum_{k=1}^n \left\{ \left(1 - \frac{C_k(t)}{R_k} \right) \right\} + Z \left(\frac{B_k(t) + C_k(t) - D_k(t)}{R_k} \right) \\ & + Z \left(\frac{U_k(t) + C_k(t) - D_k(t)}{R_k} \right) \end{aligned}$$

- 制約条件

$$R_k - C_k(t) \geq 0, B_k(t) \geq 0, U_k(t) \geq 0$$

$$D_k(t) - B_k(t) - C_k \geq 0, D_k(t) - U_k(t) - C_k \geq 0$$

ここで

$D_k(t)$: 電力需要家 k の消費電力量

$C_k(t)$: 電力需要家 k に対する電力消費削減要請量

n : 電力需要家の数

$B_k(t)$: 電力消費ベースロード下限

$U_k(t)$: 電力消費ピークロード上限

n : 電力需要家の数

$$Z(x) = \begin{cases} x, & \text{when } x > 0 \\ 0, & \text{when } x \leq 0 \end{cases}$$

エッジ最適化のコスト関数は3つの項から構成される。第1項はRAからの削減要請への達成に係るコストであり、実際の削減量が削減要請量に一致した場合に最小になる。第2項は、快適性・生産性に係るコストであり、その需要家で必要最低限の電力消費ベースロードを下回った場合にペナルティーのコストが発生する。第3項は省エネ性に係るコストであり、需要家があらかじめ決めた電力消費ピークロードを上回った場合にペナルティーのコストが発生する。

(3) システム全体最適化

エネルギー管理システムの全体最適化のコスト関数は、エッジ最適化の重み係数を1として、クラウド最適化のコスト関数とエッジ最適化のコスト関数を加えたものとする。

$$cost_t(\mathbf{v}_s, \mathbf{v}_c, \mathbf{v}_e) = cost_c(\mathbf{v}_s, \mathbf{v}_c) + cost_e(\mathbf{v}_s, \mathbf{v}_e)$$

なお、インテリジェントプロトコルにより、クラウドとエッジ間で交換するシェア変数は、下記に示すように、各需要家の消費電力量、電力消費削減要請量となる。

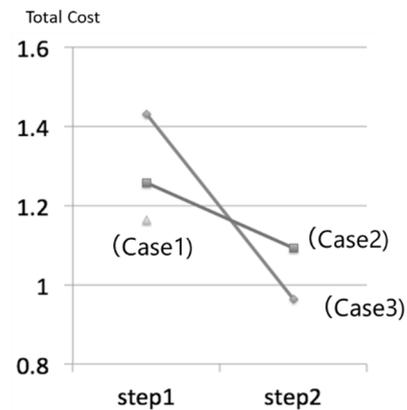


Fig.6. Example of Simulation Result

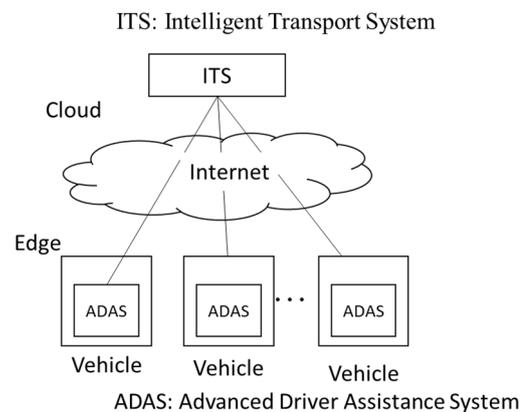


Fig.7. Intelligent Transport System

$$\mathbf{v}_s = [(D_1(t), C_1(t)), (D_2(t), C_2(t)), \dots, (D_n(t), C_n(t))]$$

(4) シミュレーション例

上記に示した定式化に基づいたDRシステムのシミュレーション例(需要家数3)を図6に示す。図において、Case1は需要家の省エネ性を考慮しない場合、Case2は省エネ性を考慮した場合、Case3は需要家の省エネ性に対する要求が強い場合である。Case2とCase3の初期段階(Step1)では、エッジ最適化コストが大きくなり、結果的にシステム全体の最適化コストがCase1よりも大きくなる。しかし、FL-IoTモデルの定式化に基づいてパレート最適解を求めたところ、Case2とCase3ともにシステム全体の最適化コストがCase1より改善されたことが分かる(Step2)。

5.2 高度道路交通システム

図7に、自動車の自動運転と連携する次世代高度道路交通システムの構成を示す。図に示すように、センター側のITS(高度道路交通システム)がクラウド、各自動車のADAS(先進運転支援システム)がエッジの位置づけとなる。高度道路交通システムへのFL-IoTモデルの適用においては、自動車のADASによる目的地最短到達性をエッジ最適化とし、ITSによる道路渋滞緩和をクラウド最適化とする。す

なわち, ADAS は, 出発点と到着点間の走行距離に加えて, 通過する交差点に設定されたコストの合計を最小化するように最適な走行ルートを決する。

一方, ITS のクラウド最適化は, 各自動車から得た走行予定ルートの情報を得て, 道路の渋滞度に応じて交差点のコストを調整し自動車に送信する。交差点のコストを得た走行中の自動車は, 走行距離と交差点コストを最小にするように走行予定ルートを修正する。このように, ITS による道路渋滞緩和のための交差点コストの調整(クラウド最適化)と, ADAS による走行距離と交差点コストの最小化(エッジ最適化)を繰り返すことにより, 高度道路交通システムのパレート最適解を得る。ここで, FL-IoT モデルのインテリジェントプロトコルによりエッジからクラウドに通知する情報は, 走行予定ルートに含まれる交差点の通過予定時刻とする。一方, クラウドからエッジに通知する情報は各交差点のコスト値とする。

6. まとめ

本稿では, クラウドによる最適化とエッジによる最適化を両立させるためのフレキシブル IoT コンピューティングモデル (FL-IoT モデル) を提案し, エネルギー管理システムについての定式化の例と, 高度道路交通システムへの FL-IoT モデル適用の考え方を示した。今後は, 高度道路交通システムについての定式化を検討するとともに, クラウド最適化とエッジ最適化が両立しない場合のシステム全体最適化の収束性について検討を進める。

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。また, 本研究を推進するに当たり, 早稲田大学 松山泰男名誉教授, 同 浦野義頼名誉教授, 千葉工業大学 藤田茂教授, 株式会社アイエスイーエム 宮西洋太郎氏には, 議論に参加いただき貴重なご意見をいただいた。

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] 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.
- [3] 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
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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
- [7] P. Palensky and D. Dietrich, "Demand Side Management: Demand Response, Intelligent Energy Systems, and Smart Loads," IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 7, Iss. 3, pp.381 - 388, Aug. 2011.