

IoT 端末を考慮したシグナリング制御による モバイルコアノードの資源利用の効率化

安達 智哉[†] 阿部 修也[†] 長谷川 剛^{††} 村田 正幸[†]

[†] 大阪大学大学院情報科学研究科 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5

^{††} 東北大学電気通信研究所 〒980-0812 宮城県仙台市青葉区片平二丁目 1 番 1 号

E-mail: [†]{to-adachi,s-abe,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, ^{††}hasegawa@riec.tohoku.ac.jp

あらまし モバイルネットワーク事業者は、自身が運用するモバイルコアネットワークのノード資源が枯渇しないように、収容端末台数や接続頻度に応じて資源割り当てを行う必要がある。一方、近年増加している IoT 端末は、接続される端末の台数を予測することは困難である。また、端末の通信開始時のシグナリング手順を削減するために、RRC Connected Inactive と呼ばれる状態を導入し、端末情報をメモリに一時的に保存することが検討されている。これらのことから、今後、モバイルコアネットワークノードへの CPU 負荷やメモリ使用量が大きく変動することが予想され、効率的な資源割り当てが求められる。そこで本報告ではモバイルコアネットワークノードにおける CPU とメモリ間の負荷のオフロード手法を提案する。具体的には、ネットワークの負荷に合わせて端末の状態を制御することにより、モバイルコアネットワークノードの CPU 負荷およびメモリ使用量のバランスを調整し、収容可能な端末台数を最大化する。端末の状態制御は、端末がデータ送受信後にアイドル状態に遷移するまでの時間を制御することで実現する。提案手法により、モバイルコアネットワークノードの資源を増強することなく、収容可能な端末台数が最大で約 150% 向上することを示す。

キーワード モバイルコアネットワーク, IoT 通信, 資源割り当て, RRC Connected Inactive

1. ま え が き

モバイルネットワーク事業者は、自身が運用するモバイルコアネットワークのノード資源が枯渇しないように、収容端末台数や接続頻度に応じて資源割り当てを行う必要がある。主なノード資源として、CPU およびメモリが挙げられる。CPU は、アタッチやデタッチ等のシグナリングに関する通信や処理を実行するために必要とされる資源である。一方メモリは、ベアラなどの端末のセッション情報を保持するために必要とされる資源である。これらのノード資源は、モバイルコアネットワークにおける通信を実現するために必須であり、どちらか一方でも枯渇することは許されない。

一方、近年は IoT 端末の急激な増加が注目されている。IoT 端末は、スマートフォンのようなユーザ端末とは異なり、家電や自動車、電気メータ、センサなど様々な場所、様々な用途で使用される可能性があり、端末の台数およびその分布を予測することは困難である。そのため、多数の IoT 端末を収容するためにノード資源を過不足なく割り当てることは難しい。

また、IoT 端末はスマートフォン等の従来の端末とはその通信特性が異なり、データ送信に周期性や間欠性を持つという特徴がある。そのため、データ送信ごとにアイドル状態と接続状態を遷移することが予想される。その結果、端末のネットワーク接続やデータ送信に必要なシグナリングに関する通信や処理を行う、制御プレーンの輻輳が悪化すると考えられ

る。このような問題に対し、RRC Connected Inactive と呼ばれる新たな状態を導入することによって、特に IoT 端末を対象に、シグナリング手順の削減を目標とする研究が行われている [1, 2]。RRC Connected Inactive 状態とは、端末がネットワークから切り離された後も、端末のセッション情報をモバイルコアネットワークノードのメモリに保持している状態である。端末のセッション情報を破棄するアイドル状態とは異なり、モバイルコアネットワークノードのメモリ使用量が増加する一方で、その端末が再び接続状態へ遷移する際に発生するシグナリング手順の一部を省略できるため、CPU 負荷の削減が可能となり、制御プレーンの輻輳の抑制が期待できる。文献 [1, 2] においては、RRC Connected Inactive を導入することにより、シグナリングオーバーヘッドの削減が可能であることが示されている。

このように、接続台数の予測が難しい IoT 端末の普及や、モバイルコアネットワークノードに与える負荷を変化させるような新たな状態の導入により、モバイルコアネットワークノードの CPU 負荷やメモリ使用量が時間的に大きく変動することが予想される。そのため、モバイルネットワーク事業者は、これまで以上に効率的に資源割り当てを行う必要がある。

上述のような資源需要の予測が難しく、変動が激しいモバイルコアネットワークにおいて、収容可能な端末台数の増加を目的とした既存研究として、稼働するサーバやインスタンスの数を需要に応じて増減させる手法が提案されている [3-7]。しかし、そのような手法では、本来必要とされているよりも多く

の資源が供給される問題がある。なぜなら、サーバやインスタンス一台あたりの資源構成は固定であることが一般的であり、偏った資源需要に対してサーバやインスタンスを増加すると、本来増強する必要のない資源も供給されるためである。文献 [4] では、IoT 端末を収容している MME のノード台数を単純に増加すると、一部の資源が過剰に供給される可能性があることを述べている。

また、サーバの資源を効率よく活用するためにサーバの資源を分離し、各資源を個別に増強、更新可能とする Server Disaggregation アーキテクチャが提案されている [8–13]。文献 [8] では、Server Disaggregation アーキテクチャをデータセンタに適用することで、CPU やメモリなどの資源を需要に合わせて自由に組み替えることが可能になり、資源の効率的な利用が可能であることが示されている。しかし、Server Disaggregation は、年単位などの長期的なサーバ更新のためのアーキテクチャであり、本報告で対象とするような突発的な負荷変動に対応することを目的とした方式ではない。文献 [13] では、Server Disaggregation アーキテクチャを適用したシステムにおいて、細かい時間粒度で資源制御を行った場合、サーバ資源の再割り当て処理に伴う遅延やコスト面でのオーバーヘッドが大きくなることが示されている。

本報告では、モバイルコアネットワークの端末収容を対象とし、柔軟かつ効率的な、ノード資源の制御手法を提案する。具体的には、モバイルコアネットワークの負荷に応じて、端末の状態を制御することにより、モバイルコアネットワークノードの CPU 負荷およびメモリ使用量を調整することで、収容可能な端末台数を最大化する。端末の状態の制御は、端末が最後にデータを送信したあと、Connected Inactive 状態からアイドル状態に遷移するまでの時間を適応的に設定することで実現する。さらに、提案手法によるモバイルコアネットワークの性能向上に関する解析的評価を行う。具体的には、端末の通信状態に応じて発生する、モバイルコアネットワークの負荷を数学的解析によって導出し、我々の研究グループの実験結果などを用いて、定量的な評価を行う。

本報告の構成は以下の通りである。第 2 章では、本報告において評価対象となるモバイルコアネットワークの構成、シグナリング手順および端末の状態遷移について述べる。第 3 章では、提案手法について述べる。第 4 章では、数学的解析によって、モバイルコアネットワークに発生する CPU 負荷およびメモリ使用量を導出する。第 5 章では、定量的な評価を行うためのパラメータ設定を行う。第 6 章では、提案手法がモバイルコアネットワークの収容可能な端末台数に与える影響を評価する。最後に第 7 章で本報告のまとめと今後の課題について述べる。

2. モバイルコアネットワークアーキテクチャ

2.1 ネットワーク構成

図 1 にモバイルコアネットワークを示す。図中の各ノードは、以下に示す機能を持つ。

- **User Equipment (UE):** スマートフォンやタブレッ

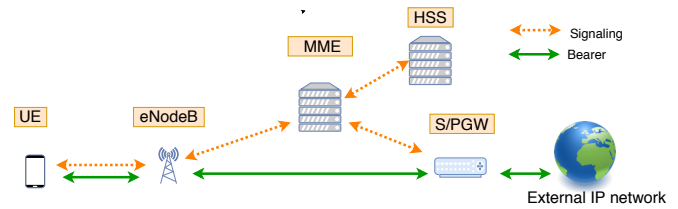


図 1 モバイルコアネットワークモデル

ト、IoT などの端末。

- **evolved NodeB (eNodeB):** UE と無線で通信を行い、MME 及び S/PGW とシグナリングメッセージやユーザデータを交換する無線基地局。

- **Mobility Management Entity (MME):** UE やユーザの認証、UE の移動管理及びパケットの経路設定の制御などを行い、モバイルコアネットワークにおけるシグナリングに関する処理の中核となるノード。

- **Serving Gateway / Packet Data Network Gateway (S/PGW):** MME からのシグナリングメッセージに基づいて、モバイルコアネットワークと外部のネットワーク (External IP Network) を接続するノード。UE が eNodeB 間を移動した際のアンカーポイントとしても機能する。

- **Home Subscriber Server (HSS):** ユーザごとの契約情報、認証用のキーデータ及び MME のアドレスなどの情報を管理するデータベースノード。

2.2 シグナリング手順

図 1 のモバイルコアネットワークにおいて、UE が外部 IP ネットワークと通信する際、UE と eNodeB 間、eNodeB と S/PGW 間及び S/PGW 内にそれぞれベアラと呼ばれる論理的なトンネルを UE 毎に確立する。

UE は接続状態、アイドル状態、及び Connected Inactive 状態という 3 つの状態を持つものとする。接続状態とは、全てのベアラが確立されており、ユーザデータの送受信が可能な状態である。アイドル状態とは、ベアラを確立していない状態である。この状態では、UE の消費電力は小さいが、ユーザデータの送受信を行うためには、シグナリング手順を行い、接続状態へ遷移する必要がある。Connected Inactive 状態とは、文献 [1, 2] など近年検討されている UE の新しい状態であり、UE と eNodeB 間のベアラは解放されているが、eNodeB と S/PGW 間及び S/PGW 内のベアラは保持している状態である。この状態では、UE の消費電力は小さく、かつ、接続状態へ遷移するためのシグナリング手順を一部省略することが可能である。一方、UE のセッション情報を保持し続ける必要があり、モバイルコアネットワークノードのメモリ使用量が増加する。

図 2 に、アイドル状態及び Connected Inactive 状態から接続状態に遷移するためのシグナリング手順を示す。図中の req., res., cmp., cmd., msg., ctxt はそれぞれ request, response, complete, command, message, context を意味する。また、図中で青色で示されている、5 番以降のシグナリング処理及びシグナリングメッセージは、Connected Inactive 状態から接続状

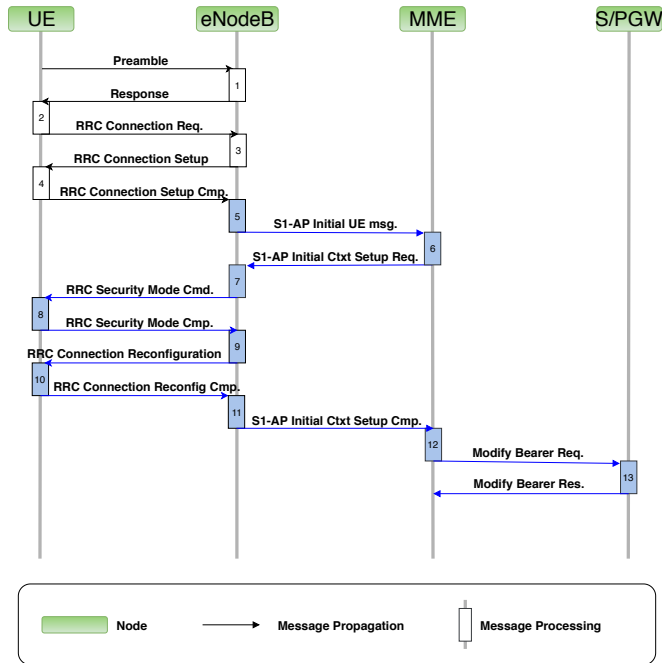


図2 アイドル状態及び Connected Inactive 状態から接続状態へ遷移する際のシグナリング手順 [2, 14]

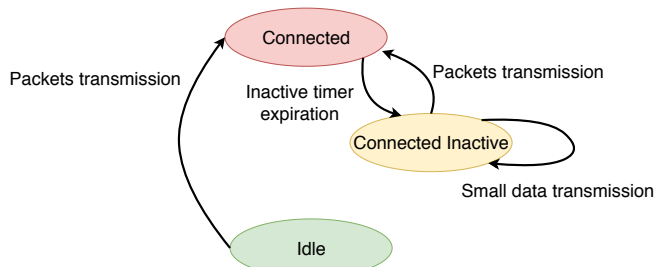


図3 UEの状態遷移図

態に遷移する際には省略される。

2.3 UEの状態遷移

UEの状態遷移図を図3に示す。図中の Connected, Idle, Connected Inactive は UE の状態を表し、それぞれ接続状態、アイドル状態、Connected Inactive 状態に相当する。アイドル状態の UE は、データ送信要求が発生すると接続状態へ遷移する。その後、Inactive タイマを起動し、そのタイマが切れるまでデータの送受信が発生しなければ、Connected Inactive 状態へ遷移する。Connected Inactive 状態の UE は、データ送信的タイミングで再び接続状態へ遷移する。この時、送信データ量が小さい場合は、接続状態へ遷移することなく、データ送信が行われる。これは、シグナリングメッセージに送信データを含めることで実現される。

3. 提案手法

Connected Inactive 状態を導入することにより、アイドル状態への遷移が発生しないため、シグナリングメッセージの発生が抑制される。そのため、モバイルコアネットワークノードの CPU 負荷を削減できる。一方、Connected Inactive 状態では、UE のセッション情報を保持するため、モバイルコアネッ

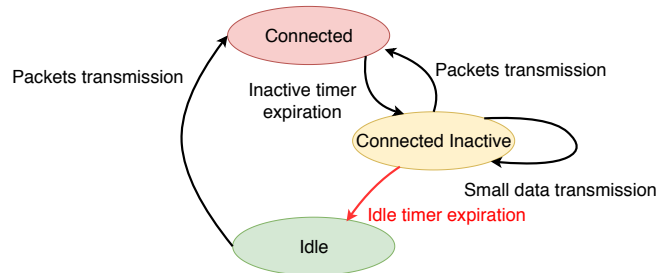


図4 提案手法適用した場合における UE の状態遷移図

トワークノードのメモリ使用量が増加する。特に、今後増加すると予想される IoT 端末には通信間隔の大きなものがあり、そのような UE に対して Connected Inactive 状態を導入すると、低頻度のデータ送信に対して長期間 Connected Inactive 状態を維持するため、メモリが浪費される。

この問題に対し、Connected Inactive 状態の UE をアイドル状態へ遷移させる新たな状態遷移を導入することで、モバイルコアネットワークノードの CPU 負荷およびメモリ使用量を制御することを提案する。図4に、提案手法を適用した場合における、UE の状態遷移図を示す。図3と比較して、Connected Inactive 状態からアイドル状態への状態遷移が追加されている。この遷移は、Inactive タイマとは別の、Idle タイマによって制御される。UE がデータの送受信を終了したタイミングで Idle タイマが起動し、Idle タイマが切れるまでデータの送受信が発生しなければ、その UE はアイドル状態へ遷移する。その際、UE のセッション情報を解放するため、メモリ使用量が削減される。一方、この遷移はシグナリングを伴うため、モバイルコアネットワークノードの CPU 負荷を増加させる。

以上のことから、Idle タイマの値を適切に設定することによって、モバイルコアネットワークノードの CPU 負荷及びメモリ使用量を制御できることがわかる。提案手法では、Idle タイマを適応的に設定して CPU とメモリ間で負荷をオフロードすることにより、両者の負荷を調整して、モバイルコアネットワークの資源の利用効率を向上する。

4. 性能解析

本章では、提案手法がモバイルコアネットワークの性能に与える影響を定量的に評価することを目的とし、数学的解析に基づくモバイルコアネットワークの負荷の導出を行い、UE の収容可能条件を明らかにする。

本章の解析においては、文献 [4] に基づき、MME がモバイルコアネットワーク内でのボトルネックになると仮定し、MME の CPU 負荷とメモリ使用量に着目する。また、対象とする UE は周期的な通信を行い、その周期は既知であると仮定する。また、一般的にデータプレーンと制御プレーンのリソースは分離されていることから、制御プレーンの負荷のみに着目する。また、データ送信にかかる時間は UE の通信周期と比べて十分小さいものと仮定する。

4.1 CPU 負荷の導出

CPU 負荷は 1 秒あたりに MME が処理するシグナリン

表 1 UE の状態遷移に伴い, MME に発生するシグナリングメッセージ数

State Transition		The number of signaling occurrences
Source	Destination	
Connected	Connected	$s_{\text{MME}}^{c \rightarrow c}$
Connected Inactive	Connected Inactive	$s_{\text{MME}}^{ci \rightarrow ci}$
Connected	Connected Inactive	$s_{\text{MME}}^{c \rightarrow ci}$
Connected Inactive	Connected	$s_{\text{MME}}^{ci \rightarrow c}$
Connected Inactive	Idle	$s_{\text{MME}}^{ci \rightarrow i}$
Idle	Connected	$s_{\text{MME}}^{i \rightarrow c}$

グメッセージ数を基に導出する. N_{UE} 台の UE がモバイルコアネットワークに存在するとし, UE の集合 \mathbf{U} を, $\mathbf{U} = \{u_1, u_2, \dots, u_{N_{\text{UE}}}\}$ と定義する. Inactive タイマを T^{ci} , Idle タイマを T^{i} , ある UE u_h ($u_h \in \mathbf{U}$) の通信周期を T_h とする. Idle タイマが T^{i} である時の, UE u_h が 1 秒あたりに発生させる平均のシグナリングメッセージ数を $c_h(T^{\text{i}})$ とする. また, UE の状態遷移に伴い, MME に対して発生するシグナリングメッセージ数をそれぞれ表 1 のように定義すると, $c_h(T^{\text{i}})$ は T_h および T^{ci} を用いて以下の式 (1) で表せる. ここで, 以下では $T^{\text{i}} \geq T^{\text{ci}}$ が常に成り立つものとする.

$$c_h(T^{\text{i}}) = \begin{cases} \frac{1}{T_h} \cdot s_{\text{MME}}^{c \rightarrow c} & \text{if } T_h \leq T^{\text{ci}} \\ \frac{1}{T_h} \cdot (s_{\text{MME}}^{ci \rightarrow c} + s_{\text{MME}}^{c \rightarrow ci}) \cdot d_h & \text{if } T^{\text{ci}} < T_h \leq T^{\text{i}} \\ \quad + \frac{1}{T_h} \cdot s_{\text{MME}}^{ci \rightarrow ci} \cdot (1 - d_h) & \\ \frac{1}{T_h} \cdot (s_{\text{MME}}^{i \rightarrow c} + s_{\text{MME}}^{c \rightarrow ci} + s_{\text{MME}}^{ci \rightarrow i}) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

ここで, d_h は UE u_h がデータ送信の際に接続状態へ遷移する確率を表す. これは, Connected Inactive 状態の UE は, 送信データ量が閾値より小さいとき, 接続状態へ遷移せずにデータ送信を行うことを考慮している.

MME に対してネットワーク全体で 1 秒毎に発生するシグナリングメッセージ数の平均を $C(T^{\text{i}})$ と定義する. $C(T^{\text{i}})$ は $c_h(T^{\text{i}})$ を用いて以下の式 (2) で表せる.

$$C(T^{\text{i}}) = \sum_{h=1}^{N_{\text{UE}}} c_h(T^{\text{i}}) \quad (2)$$

4.2 メモリ使用量の導出

Idle タイマが T^{i} である時の, UE u_h が接続状態である時間割合を $\tau_h^c(T^{\text{i}})$, Connected Inactive 状態である時間割合を $\tau_h^{ci}(T^{\text{i}})$, アイドル状態である時間割合を $\tau_h^i(T^{\text{i}})$ と定義する. これらは, T_h および T^{ci} を用いて以下の式 (3), (4), (5) で表せる.

$$\tau_h^c(T^{\text{i}}) = \begin{cases} 1 & \text{if } T_h \leq T^{\text{ci}} \\ \frac{T^{\text{ci}}}{T_h} \cdot d_h + \frac{0}{T_h} \cdot (1 - d_h) & \text{if } T^{\text{ci}} < T_h \leq T^{\text{i}} \\ \frac{T^{\text{ci}}}{T_h} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

表 2 各状態における UE 1 台当たりの MME のメモリ使用量の定義

state	load of MME memory
Connected	m_{MME}^c
Connected Inactive	m_{MME}^{ci}
Idle	m_{MME}^i

$$\tau_h^{ci}(T^{\text{i}}) = \begin{cases} 0 & \text{if } T_h \leq T^{\text{ci}} \\ \frac{T_h - T^{\text{ci}}}{T_h} \cdot d_h + \frac{T_h}{T_h} \cdot (1 - d_h) & \text{if } T^{\text{ci}} < T_h \leq T^{\text{i}} \\ \frac{T^{\text{i}} - T^{\text{ci}}}{T_h} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

$$\tau_h^i(T^{\text{i}}) = \begin{cases} 0 & \text{if } T_h \leq T^{\text{ci}} \\ 0 & \text{if } T^{\text{ci}} < T_h \leq T^{\text{i}} \\ \frac{T_h - T^{\text{i}}}{T_h} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

各状態におけるメモリ使用量をそれぞれ表 2 のように定義すると, UE u_h が MME に与えるメモリ使用量の平均 $m_h(T^{\text{i}})$ は以下の式 (6) で表せる.

$$m_h(T^{\text{i}}) = m_{\text{MME}}^c \cdot \tau_h^c(T^{\text{i}}) + m_{\text{MME}}^{ci} \cdot \tau_h^{ci}(T^{\text{i}}) + m_{\text{MME}}^i \cdot \tau_h^i(T^{\text{i}}) \quad (6)$$

MME に対してネットワーク全体で発生する平均的なメモリ使用量を $M(T^{\text{i}})$ と定義する. $M(T^{\text{i}})$ は $m_h(T^{\text{i}})$ を用いて以下の式 (7) で表せる.

$$M(T^{\text{i}}) = \sum_{h=1}^{N_{\text{UE}}} m_h(T^{\text{i}}) \quad (7)$$

4.3 UE の収容可能条件

CPU が 1 秒あたりに処理できるシグナリングメッセージ数の最大値及びメモリのサイズをそれぞれ C^{max} , M^{max} とする. この時, 以下の式 (8) に示した 2 つの条件を同時に満たすような T^{i} が存在するならば, 与えられた UE は全て収容可能である.

$$\begin{aligned} C(T^{\text{i}}) &\leq C^{\text{max}} \\ M(T^{\text{i}}) &\leq M^{\text{max}} \end{aligned} \quad (8)$$

5. パラメータ設定

本章では, 第 4. 章における解析のパラメータ設定を行う. 第 4. 章で定義したパラメータとそのパラメータに対する数値例を表 3 に示す. Inactive タイマは, 10s に設定した. また, UE の状態遷移に伴うシグナリングメッセージ数は, 文献 [14] および [2] に基づき設定した. ここで, 文献 [14] および [2] に明示されていない一部の状態遷移に関しては, 独自に推定した. また, UE の状態に応じて発生する MME のメモリ使用量は, OAI のソースコードに基づき設定した. 具体的には, MME が保持する情報及びその情報量を, OAI のソースコードを静的解析することにより求め, メモリ使用量とした. ここで, Connected Inactive 状態に関しては OAI で実装されていないため, 文献 [14] 及び [2] に基づくシグナリング手順を踏ま

表 3 数 値 例

Parameter	Numerical setting
T^{ci}	10(s)
$s_{MME}^{c \rightarrow c}$	0(signaling messages)
$s_{MME}^{ci \rightarrow ci}$	0(signaling messages)
$s_{MME}^{c \rightarrow ci}$	0(signaling messages)
$s_{MME}^{ci \rightarrow c}$	0(signaling messages)
$s_{MME}^{ci \rightarrow i}$	5(signaling messages)
$s_{MME}^{i \rightarrow c}$	5(signaling messages)
m_{MME}^c	17878(bit)
m_{MME}^{ci}	17878(bit)
m_{MME}^i	408(bit)
C^{max}	1200(signaling messages/s)
M^{max}	1000(MB)

え、接続状態と同等のメモリ使用量になると推定した。また、MME が 1 秒あたりに処理できるシグナリングメッセージ数は文献 [15] を基に設定した。また、MME のメモリサイズは 1000MB とした。

6. 評価結果と考察

7. まとめと今後の課題

References

- [1] S. Hailu, M. Saily, and O. Tirkkonen, “RRC State Handling for 5G,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 57, no. 1, pp. 106–113, Jan. 2019.
- [2] I. L. Da Silva, G. Mildh, M. Saily, and S. Hailu, “A Novel State Model for 5G Radio Access Networks,” in *Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC)*, May 2016, pp. 632–637.
- [3] M. Shimizu, H. Nakazato, and H. Seshake, “Scale-Out Architecture for Service Order Processing Systems,” in *Proceedings of 2013 IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management (IM 2013)*, May 2013, pp. 880–883.
- [4] P. C. Amogh, G. Veeramachaneni, A. K. Rangiseti, B. R. Tamma, and A. A. Franklin, “A Cloud Native Solution for Dynamic Auto Scaling of MME in LTE,” in *Proceedings of 2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Oct. 2017, pp. 1–7.
- [5] I. Alawe, Y. Hadjadj-Aoul, A. Ksentini, P. Bertin, and D. Darche, “On the Scalability of 5G Core Network: The AMF Case,” in *Proceedings of 2018 15th IEEE Annual Consumer Communications Networking Conference (CCNC)*, Jan. 2018, pp. 1–6.
- [6] Y. Ren, T. Phung-Duc, J. Chen, and Z. Yu, “Dynamic Auto Scaling Algorithm (DASA) for 5G Mobile Networks,” in *Proceedings of 2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Dec. 2016, pp. 1–6.
- [7] C. H. T. Arteaga, F. Rissoi, and O. M. C. Rendon, “An Adaptive Scaling Mechanism for Managing Performance Variations in Network Functions Virtualization: A Case Study in an NFV-Based EPC,” in *Proceedings of 2017 13th International Conference on Network and Service Management (CNSM)*, Nov. 2017, pp. 1–7.
- [8] M. Mahloo, J. M. Soares, and A. Roozbeh, “Techno-Economic Framework for Cloud Infrastructure: A Cost Study of Resource Disaggregation,” in *Proceedings of 2017 Federated Conference on Computer Science and Information Sys-*

tems (FedCSIS), Sep. 2017, pp. 733–742.

- [9] “Intel’ s Disaggregated Server Rack,” Moor Insights Strategy, Technical Report (TR), Aug. 2013.
- [10] C. Devaki and L. Rainer, “Enhanced Back-off Timer Solution for GTP-C Overload Control,” Feb. 2016. [Online]. Available: <http://www.freepatentsonline.com/y2016/0057652.html>
- [11] B. Abali, R. J. Eickemeyer, H. Franke, C. Li, and M. Taubenblatt, “Disaggregated and Optically Interconnected Memory: When will it be cost effective?” *CoRR*, vol. abs/1503.01416, 2015. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1503.01416>
- [12] “Disaggregated Servers Drive Data Center Efficiency and Innovation,” Intel Corporation, Technical Report (TR), Jun. 2017.
- [13] S. Legtchenko, H. Williams, K. Razavi, A. Donnelly, R. Black, A. Douglas, N. Cheriére, D. Fryer, K. Mast, A. D. Brown, A. Klimovic, A. Slowey, and A. Rowstron, “Understanding Rack-Scale Disaggregated Storage,” in *Proceedings of 9th USENIX Workshop on Hot Topics in Storage and File Systems (HotStorage 17)*. Santa Clara, CA: USENIX Association, 2017. [Online]. Available: <https://www.usenix.org/conference/hotstorage17/program/presentation/legtchenko>
- [14] 3GPP, “Study on architecture enhancements for Cellular Internet of Things (CIoT),” 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Report (TR) 23.720, Mar. 2016, version 13.0.0. [Online]. Available: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2894>
- [15] 上野真生, 長谷川 剛, 村田正幸, “多数の M2M/IoT 端末からの集中アクセスを考慮したモバイルコアネットワークの実験評価,” in *Proceedings of 電子情報通信学会技術研究報告 (NS2018-226)*, Mar. 2019.