

多量な機器接続を実現する通信制御・管理技術の研究

メタデータ	言語: ja 出版者: 静岡大学 公開日: 2017-12-14 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 荒井, 大輔 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.14945/00024350

静岡大学博士論文

多量な機器接続を実現する通信制御・
管理技術の研究

荒井 大輔

大学院自然科学系教育部

情報科学専攻

2017年6月

目次

第1章	はじめに	1
1.1	本研究の目的：M2Mを社会インフラとする	4
1.2	M2Mの論理構成と本論文が取り組む課題	4
1.2.1	課題1：煩雑なM2Mデバイスの接続設定が普及の阻害要因となる	6
1.2.2	課題2：瞬間的な輻輳が設備障害を誘発する	7
1.2.3	課題3：輻輳制御がユーザの体感品質低下を招く	10
1.3	本論文の構成	10
第2章	接続設定の煩雑さを解消するM2Mデバイス設定管理技術	12
2.1	はじめに	12
2.2	想定環境と目的および要件	15
2.2.1	想定するM2Mネットワーク環境	15
2.2.2	提案の目的	15
2.2.3	実現を目指す動作シナリオ	16
2.2.4	目的達成のために提案が満たすべき要件	18
2.3	関連研究	19
2.4	M2Mデバイス設定管理技術の提案	20
2.4.1	提案技術の基本方針	20
2.4.2	提案技術による手順	21
2.4.3	提案技術の有効性	30
2.5	提案による接続設定時間の評価	30
2.6	アンケートを通じた受容性の確認	32
2.6.1	コンセプトデモの概要	34

2.6.2	デモ参加者へのアンケートの実施	36
2.7	まとめ	40
第3章	シグナリングスパイクを抑制する接続タイミング制御技術	41
3.1	はじめに	41
3.2	シグナリングスパイクの発生メカニズム	44
3.3	関連研究	45
3.4	端末による接続タイミング制御技術	47
3.4.1	UENAC の概要	47
3.4.2	UENAC の有効化タイミング	48
3.4.3	制御ウィンドウ長の適切化	50
3.5	提案の実装	51
3.5.1	実装した UENAC の詳細	51
3.5.2	実装した UENAC 端末による既存アプリへの影響調査	52
3.6	UENAC によるスパイク抑制効果	56
3.6.1	スパイクのモデル化	57
3.6.2	UENAC によるスパイク抑制効果シミュレーション	58
3.7	まとめ	59
第4章	通信遅延におけるユーザアウェアネスと QoE の関係に関する検討	62
4.1	はじめに	62
4.2	関連研究	63
4.2.1	通信遅延がユーザに与える影響調査	63
4.2.2	通信遅延と QoE の関係性に関する調査	64
4.2.3	通信遅延の QoE への影響を緩和するユーザインタフェースに関する研究	65
4.3	遅延による QoE 低下を緩和する方式	65
4.3.1	提案方式	66
4.3.2	補償金による通信遅延の補償	66

4.4	コンシェルジュの提示と補償金が通信遅延による QoE 低下軽減に与える影響	66
4.4.1	ユーザ実験において付与する通信遅延	67
4.4.2	ユーザ実験環境	67
4.4.3	実験用 Web コンテンツ	67
4.4.4	実験計画	68
4.5	実験結果と考察	70
4.5.1	被験者の満足度の分布	71
4.5.2	被験者の属性と満足度に対する分析	71
4.5.3	被験者の感情尺度と満足度に対する分析	74
4.6	まとめと今後の課題	74
第 5 章	おわりに	78
	謝辞	80

第1章 はじめに

2017年現在、日本においては、急速に進行する少子高齢化とそれに伴う人口減少が労働投入の減少や国内需要の縮小を招き、中長期的な経済成長を阻害することが懸念されている [1]。具体的には、日本における生産年齢人口（15歳以上65歳未満の人口層）は1995年以降減少に転じており、また、総人口も2008年以降減少に転じている。総務省の国勢調査 [2] によると、2015年には総人口1億2,520万人、生産年齢人口7,592万人であった。一方、国立社会保障・人口問題研究所の将来推計（出生中位・死亡中位推計） [3] によると2030年には総人口1億1,662万人（2015年比-6.85%）、生産年齢人口6,773万人（同-10.79%）、2060年には総人口8,674万人（2015年比-30.72%）、生産年齢人口4,418万人（同-58.19%）と推計されている。このように、今後半世紀の間に急速に進む少子高齢化とそれに伴う人口減少は、直接的に内需の縮小を招くため経済の供給面と需給面の双方に悪影響となって表れ、中長期的な経済成長を阻害する。

また、日本以外の地域においても今後半世紀で急速な高齢化が進むとの推計があり [4]、こうした人口の変化に伴う経済成長への懸念は、日本に限らず世界的に顕在化している状況にある。ここで、世界における日本と先進地域、開発途上地域の高齢化率の推計結果を図1に示す [5]。推計によると世界の総人口は2015年時点の73億4,947万人から、2060年までに101億8,429万人に増加するが、この総人口に占める65歳以上の人の割合（高齢化率）もまた2015年の8.3%から18.1%（2060年）に上昇する [5]。さらに、先進地域¹においては2060年の高齢化率が27.4%と人口の4分の1以上が65歳以上となるとされており、その中でも、日本の高齢化率は高い水準で推移することがわかる。このように、日本のみならず世界的にも今後半世紀の間に急速に高齢化が進み、さらに日本を含む先進地域の一部においては少子化も同時に進む状況下にある [5]。

こうした人口の変化は、直接的に内需の縮小となって経済に悪影響を与えることが

¹ここで先進地域とは、ヨーロッパ、北部アメリカ、日本、オーストラリア及びニュージーランドからなる地域をいう。

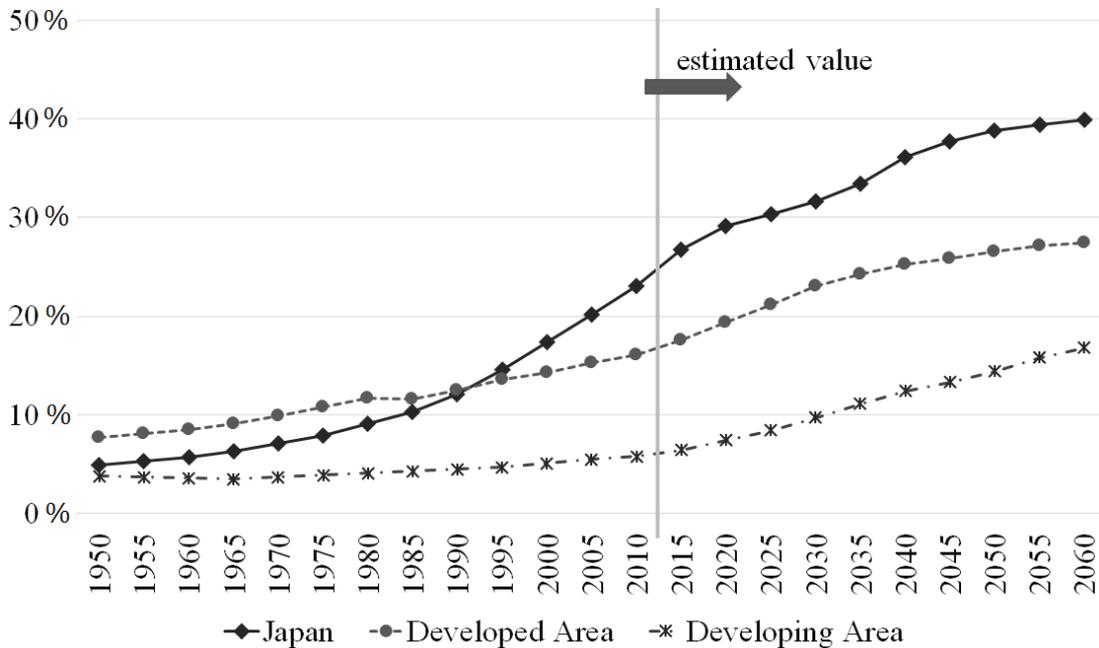


図1: 世界における高齢化率の推移

Fig.1: Ratio of the Number of People Aged 65 and over in the World.

懸念されている。図2に単身世帯の平成26年10月、11月の消費支出を男女、年齢階級別に調査した結果（日本における年齢階級別消費支出 [6]）を示す。この調査結果によると、消費支出は男女共に50歳代までは年齢階級が高くなるに従って増加する一方で、60歳代以降は減少する傾向にあることがわかる。こうした年齢階級別の消費支出傾向が続き、さらに全体の高齢化率が進んだ場合には総人口を維持したとしても全体の消費支出は減少するため、内需の縮小につながり、経済成長が阻害される。

経済成長を実現するためには、(1) 労働力の増加、(2) 資本の増加、(3) 技術進歩が必要とされており、このうち (1) 労働力の増加については上述の通り困難な状況にあるため、本論文では、(3) 技術進歩によって経済成長に貢献することを目的とする²。

本論文の研究分野であるICT(Information and Communication Technology)分野に着目した場合、技術進歩をもたらす技術として、次の3つが注目されている [1]。

- M2M(Machine to Machine)/IoT(Internet of Things)

あらゆるモノ(物理的な物体)がインターネットに接続することで、モノから得

² (2) 資本の増加については経済政策に関わる部分が大きく本論文の対象外とする。

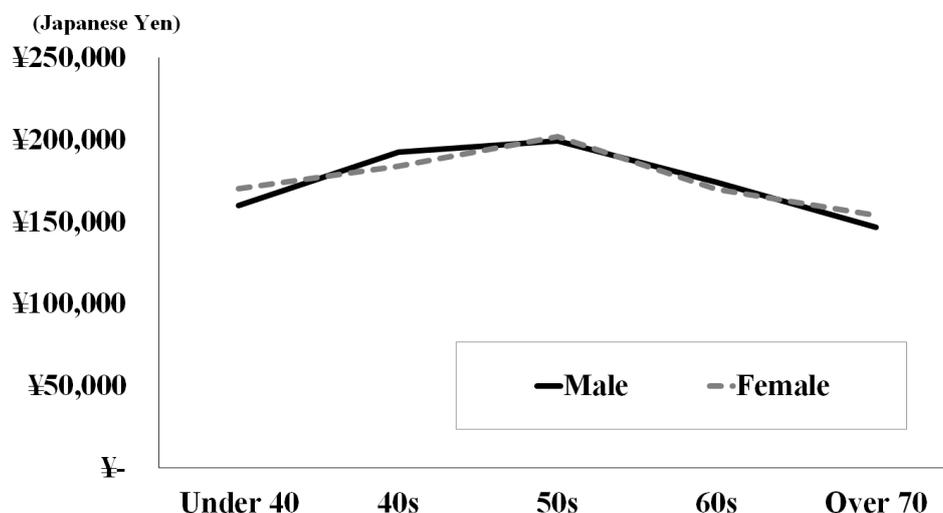


図2: 日本における年齢階級別消費支出（単身世帯）

Fig.2: Consumption Expenditure by Age Class in Japan (A Single Person).

られるデータの収集・分析等の処理や活用を実現し，製造業や物流，医療・健康から農業に至る様々な分野で，状況を正確に把握することによる効率化を進め，さらに，データ分析を通じて新たな価値を創造しようという試み。

- ビッグデータ

大量のデータの収集・蓄積・保存・管理・分析そして共有のための技術革新を促進し，科学・工学における発見の加速，安全保障の強化，教育の革新に活用しようという試み。

- 人工知能（AI, Artificial Intelligence）

膨大なコンピュータリソースを用いてビッグデータの分析を行い，コンピュータがデータに含まれるルールや知識を獲得しようとする試み。

これら注目技術のうち，ビッグデータや人工知能の実現には大量のデータが必要なことから，大量のデータ収集を実現する M2M/IoT に本論文では注目する³。本研究の目的は，M2M を実現するために直面する技術的な課題の解決をもって，持続的な経済成長に貢献することにある。

³以降，本論文では M2M と IoT を区別せず単に M2M と呼び，さらに，こうした技術を用いたサービスを M2M サービス，M2M サービスを構成する機器を M2M デバイスと呼ぶ。

1.1 本研究の目的：M2Mを社会インフラとする

M2Mを実現するための技術的な課題について述べる前に、本研究で扱うM2Mの実現について本節で詳述する。

M2Mの実現とは、特定通信・放送開発事業実施円滑化法 [7] において「インターネットに多様かつ多数の物が接続され、及びそれらの物から送信され、又はそれらの物に送信される大量の情報の円滑な流通が国民生活及び経済活動の基盤となる社会の実現」と規定されていることから、様々な機器をインターネットに接続した上で、それらを社会インフラ（経済活動の基盤）として機能させることと定義する。

またさらに、社会インフラとして機能させるとは、既に存在する社会インフラ（道路、港湾、空港、上下水道や電気・ガス、医療、消防・警察、行政サービス [8] 等）と同様に、年齢、性別、地域を問わず利用を望むものがあれば誰でも利用可能な状態とすることと定義する。

以上の定義より、本研究の目的であるM2Mの実現とは、誰もが利用可能なM2Mを実現する（社会インフラとして機能させる）ことにあると言い換えることができる。

1.2 M2Mの論理構成と本論文が取り組む課題

誰もが利用可能なM2Mを実現するために本論文が取り組む技術課題を整理する。技術課題整理のため、本論部において想定するM2Mデバイスがインターネットに接続する際の論理構成を図3に示す。

標準化団体ETSI (European Telecommunications Standards Institute) によるM2M構成に示されるように [9], M2Mデバイスの中には直接LTE等の無線アクセス網 (RAN, Radio Access Network) を介してインターネットに接続可能なデバイス (図3右下に示すM2Mデバイス) と、そうしたデバイスをゲートウェイとしWi-FiやBluetooth等の近距離無線通信技術で構成されるPAN (Personal Area Network) を経由して接続されるM2Mデバイス (図3左下に示すM2Mデバイス) とが存在することを想定する⁴。

⁴M2Mデバイスがインターネットに接続する際、FTTH(Fiber To The Home)等の固定アクセス回線を利用することも可能ではあるが、M2Mの目的があらゆるモノをインターネット接続することであり、またその対象分野も多岐に及ぶことから、LTE等の無線アクセスが一般的に普及することが考えられるため、本研究では無線アクセスを用いる場合を想定する。

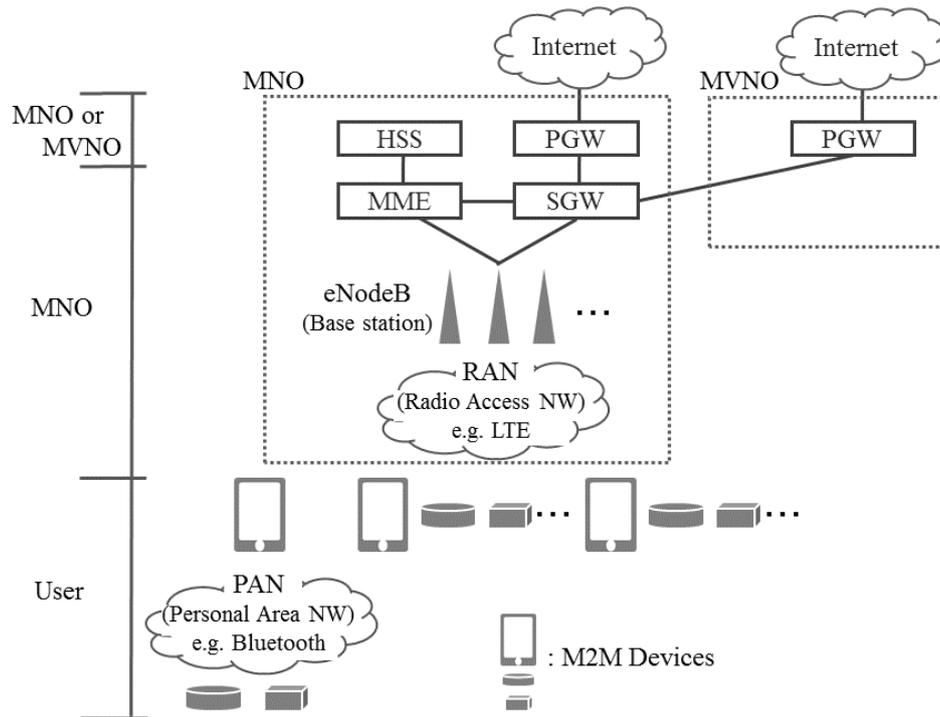


図3: MNO と MVNO および M2M デバイスの論理構成
 Fig.3: Architecture of MNO, MVNO and M2M Devices.

RAN に接続可能な M2M デバイスは移動体通信事業者 (MNO, Mobile Network Operator) または仮想移動体通信事業者 (MVNO, Mobile Virtual Network Operator) とネットワーク接続のための契約締結によりインターネットに接続可能となる一方, PAN を経由してインターネットに接続される M2M デバイスは, あらかじめ利用者自身によって M2M デバイスとゲートウェイとの間の接続設定を実施する必要がある. こうした構成を踏まえ, 著者らは次の3つの技術課題を設定した.

課題 1 煩雑な M2M デバイスのインターネット接続設定が普及の阻害要因となる

課題 2 ネットワーク設備 (RAN) における瞬間的な輻輳が設備障害を誘発する

課題 3 ネットワークの輻輳制御がユーザの体感品質低下を招く

M2M の実現のため数ある技術課題の中で, 著者らが設定した3つの技術課題の解決の必要性について以降に詳述する.

1.2.1 課題1：煩雑な M2M デバイスの接続設定が普及の阻害要因となる

本課題は，PAN を経由してインターネットに接続される M2M デバイスが，あらかじめ利用者自身によって M2M デバイスとゲートウェイとの間の接続設定を必要とすることに起因する。

M2M デバイスとゲートウェイ間の接続設定を最も実施するのは，デバイス数および成長率から [10] 一般コンシューマでが想定される⁵。また，一般コンシューマが所有する M2M デバイスの多くは Wi-Fi[11] や Bluetooth[12] 等の近距離無線通信のみを利用するデバイスが想定され，中でも Bluetooth が多いとの試算がある [13]。

Ethernet 等の有線接続を利用する場合の接続設定であれば，利用者が通信したい通信機器間を物理的なケーブルで接続することを機器が自動的に認識できるため，接続設定を大幅に簡略化する技術が実現されており，利用者は設定操作そのものを意識することなく利用できる環境が広がりつつある [14, 15, 16, 17, 18, 19]。一方，本論文で想定するような Bluetooth を利用する M2M デバイスとゲートウェイ間の接続設定については，利用者自身が接続設定の必要性を認識したうえで接続設定手順を実行する必要がある。

具体的には，機器があらかじめ備える設定機能を実行した後に文字入力する，接続設定用のプログラムを利用者が通信したい機器間で同時に起動する等により実現される。なお，ここで接続設定とは，レイヤ 2 接続（有線接続の場合には，すでに物理的なケーブルが接続されている。無線接続の場合にはリンクが確立されていること）のための設定操作を指す。有線接続の場合に自動的に完了するのは，物理的なケーブル接続によって既にレイヤ 2 接続が確立されるためであり，無線の場合には無線が到達可能な範囲に（セキュリティ上，場合により通信が好ましくないデバイスを含め）複数のデバイスが存在するため，利用者が意図するデバイス間でのみ適切にレイヤ 2 接続を確立するための操作が必要となる。

こうした近距離無線通信のみを利用する M2M デバイスとゲートウェイ間の接続設定の煩雑さの改善は，現在も活発に研究開発が進められており [20]，利用者の直感的

⁵ここで一般コンシューマ向けとは，家電（白物・デジタル），プリンターなどのパソコン周辺機器，ポータブルオーディオ，スマート玩具（玩具），スポーツ・フィットネス用途の機器を指す。このほか，調査結果 [10] においては，「軍事・宇宙・航空」，「自動車」，「医療」，「産業用途」，「コンピュータ」，「通信」といった産業に分類し，試算している。

な操作で設定操作が完了する技術 (spontaneous association) の実現が求められているが、解決していない。本論文では、こうした接続設定を一般コンシューマが煩雑に感じ、M2M 実現の阻害要因となる現状を課題ととらえ、解決を図ることとした。

1.2.2 課題 2：瞬間的な輻輳が設備障害を誘発する

本課題は、M2M デバイスの通信経路が国内に数社しかない移動体通信事業者 (MNO) に集約されるために集約箇所で瞬間的な輻輳が発生しやすい構成となることに起因する。本論文では、こうした集約箇所で瞬間的に発生する輻輳が設備障害を誘発し、M2M サービスの安定提供を阻害するために M2M 実現の阻害要因となる現状を課題ととらえ、解決を図ることとした。

以降、本節内においては、M2M デバイスがインターネットに接続されるまでの通信経路と、その通信経路が国内に数社しかない移動体通信事業者 (MNO) に集約される構造となる背景情報について述べる。

RAN に接続可能な M2M デバイスは移動体通信事業者 (MNO) または仮想移動体通信事業者 (MVNO) とネットワーク接続のための契約締結によりインターネットに接続可能となるが、インターネットまでの通信経路については、契約締結先の事業形態 (MNO または MVNO) によらず途中まで MNO の通信設備に接続される構成となる。表 1 に契約締結先の事業形態毎に通信経路を比較する。1 に示す通り、契約先の移動体通信事業者の事業形態 (MNO または MVNO) によらず、経路 1 と経路 2 では、それぞれ MNO の eNodeB (基地局) と S GW (Serving Gateway, LTE においてユーザデータの中継機能を実現するノード) に接続され、経路 3 の PGW (Packet Data Network Gateway, 外部ネットワークと接続するゲートウェイ) で契約先移動体通信事業者により経路が分かれる⁶。また、経路 2 を確立する過程においても、MNO または MVNO によらず、MNO の MME⁷ や HSS⁸ との間で制御信号のやり取りが行われる。そのため、多量に存在する M2M デバイスは一度は必ず MNO の通信設備を経由することとなる。

⁶MVNO 事業者の中には PGW を持たず、MNO の PGW より上位 (インターネット) 側で接続し役務提供する事業者も存在するが、MVNO 独自のサービスを柔軟に提供可能なため、PGW を MVNO 事業者が所有するケースが増えており、ここでは簡単のため、MVNO 事業者が PGW を所有する構成で記載することとする。

⁷Mobility Management Entity, LTE においてネットワーク制御を扱うノード

⁸Home Subscriber Server, LTE を利用するために必要なユーザー情報を管理するデータベース

表 1: 契約先の移動体通信事業者による通信経路の差

Table1: Differences of Traffic Route between MNOs and MVNOs.

経路	MNO	MVNO
経路 1	MNO の eNodeB (基地局)	
経路 2	MNO の SGW	
経路 3	MNO の PGW	MVNO の PGW
経路 4	インターネット	

M2M デバイスが経由する MNO の実施形態を取る移動体通信事業者は日本においては主要事業者 3 社に集約している。これは、日本では電波の公平かつ能率的な利用を確保する目的から、無線局の開設にあたっては、原則として総務大臣の免許を受けなければならないこととしており [21]、その設置に関わる技術基準の高さや、広域でサービスを開始するために膨大な初期投資が必要となることに起因する。

一方、仮想移動体通信事業者 (MVNO) の実施形態をとる移動体通信事業者は、多数存在している。これは、MNO 主要事業者 3 社の通信料金が各社一律となっているなど、協調的寡占の色彩が強い状況となっていた経緯から [22]、公正競争の一層の徹底や技術革新の促進を通じ、超高速・低廉・強靱で、あらゆる産業・利用者がニーズに応じた多彩なサービスを利用・提供できる基盤を実現することを目的に、監督省庁が MVNO の普及を促進してきたことに由来する。日本では 2001 年に日本通信社が MVNO のサービス提供を開始して以来、MVNO 事業者数およびその端末数は増加しており、2016 年 12 月末時点で MVNO がサービス提供する端末の割合は 8.9% (2016 年 9 月末比 + 0.3%、2015 年 12 月末比 + 1.7%) に達している [23]。

こうした MNO と MVNO との間で共用される設備については MNO によって管理運用され、一般的に MVNO は MNO からネットワークを調達するのみであるため、MNO による管理運用状況を意識することなく MVNO 独自のサービス提供が可能となっている。また、スマートフォンや M2M デバイスの利用者についても、契約先の事業者が MNO か MVNO かを意識することなく M2M サービスを利用可能となっている。

そのため、多量の M2M デバイスは (MNO の) ネットワークの負荷状況を意識することなく利用する。こうした利用ごとに、MNO の通信設備が、M2M デバイスへの無線リソースの割当と切断を実施する必要があるが、大量の接続と切断処理が同時に発生した場合には MNO の通信設備における瞬間的な輻輳となり、一時的な過負荷状態を引き起こし、装置故障に至る場合がある [24, 25].

そうした M2M デバイスの接続要求の同期は簡単に起こり得る。具体的には、あるアプリケーションが決まった時刻にバックグラウンドで通信する (例えば毎正時にアップデートを確認する) 実装であった場合、集約設備には多数の M2M デバイスから同時刻に接続要求が到着することとなる。また、M2M サービスの提供者が、そうした集約設備の負荷を勘案し、同時刻に通信を開始しない実装としていたとしても、利用者の設定により接続要求処理が同期する場合もあり得る。具体的には、目覚ましと同時に天気や交通情報をネットワークから取得し表示するアプリケーションがあったとすると、(例えば 6 時等) 人間の行動特性として同時刻に設定する利用者が多いと多数の M2M デバイス間で間で接続処理要求が同期することとなる。またさらに、緊急地震速報 (ETWS, Earthquake and Tsunami Warning Systems) 等によって多数の M2M デバイスが同時刻に通信を開始する場面も存在しうる。こうした、多数の M2M デバイスが同時刻に接続要求することで、集約設備で接続要求を処理するための制御信号 (シグナリング) が瞬間的に大量発生する現象 (シグナリングスパイク) が、MNO の集約設備において過負荷を引き起こし、大規模なサービス影響を引き起こす [24, 25].

MNO がネットワーク接続する M2M デバイスを含め一括して提供する従来のサービスモデルにおいては、MNO が各事業者間との間で接続タイミングや M2M デバイス、M2M サービスの仕様を調整し、上記のような瞬間的な制御信号の大量発生を回避可能であった。しかしながら、上記スパイクは、MVNO 事業者数および MVNO がサービス提供する端末数の増加が見込まれる状況下においては、より顕著な問題となり得る。具体的には、MVNO 事業者は MNO のネットワークを調達して独自サービスを提供するが、MVNO の提供形態によっては、スパイクの影響を受ける設備は MNO が構築・運用することとなるため、MVNO が独自サービスを構築する際に、設備の安定運用のためのリソース把握は考慮の範囲から漏れやすい構造となっている。

そうした考慮漏れによる集約設備のリソース超過を未然に防ぐためには、MVNOとMNO間で独自のサービス提供前に十分な情報交換が必要となるが、一般にMNOとMVNO間は顧客基盤を争う競合となり得るため、独自サービス提供前にMNOとMVNO間で情報交換することはビジネス的な観点からも実現が難しい構造にある。そのため、こうしたスパイクへの対処はM2Mの実現に際し特にMNOにとっては重大な課題となっており、本論文での解決を図る。

1.2.3 課題3：輻輳制御がユーザの体感品質低下を招く

本課題は、上記課題2(瞬間的な輻輳が誘発する設備障害)を回避するために講じられる輻輳制御技術(輻輳時に設備障害を回避するため通信の一部を規制する等の対処)によって生じる通信遅延に起因する。本論文での解決を図る課題2に付随する課題であるため、輻輳制御がユーザに与える体感品質の低下の軽減についても解決を図ることとした。

1.3 本論文の構成

以降、本論文においては1.2節において設定した3つの技術課題について、各章にて解決を図る。

2章では、1.2節の『課題1：煩雑なM2Mデバイスの接続設定が普及の阻害要因となる』を解決する。具体的には、従来接続設定を直接実施したM2Mデバイスとゲートウェイ間のみが通信可能となる場所、家族等のグループが複数のゲートウェイとM2Mデバイスとを有し、接続するM2Mデバイスとゲートウェイの組合せが変わる場面を想定し、このグループ内で接続設定をシームレスに切り替える新しいデバイス設定管理技術を提案する。さらに、提案に基づくゲートウェイを実装し、提案の実現性を検証するとともに、一般向けの展示会においてコンセプトデモを実施し、デモ参加者380名へのアンケート調査を通じた提案の受容性の評価を実施する。提案と実装、評価により、本論文による提案が実現性と受容性を備えた方式となっていることを示す。

また3章では、1.2節の『課題2：瞬間的な輻輳が設備障害を誘発する』を解決する。具体的には、緊急地震速報(ETWS)を輻輳発生 of 典型的な例とし、輻輳発生 of メカ

ニズムを整理したうえで、この輻輳発生を抑制するための端末による通信タイミング制御技術（UENAC, User Equipment based Network Access Control Scheme）を新たに提案する。提案技術では、端末にあらかじめ実装されたエージェントが、外部からのトリガによって機能を有効化され、通常時であれば（アプリケーションやユーザからの）通信要求後すぐに通信を行うところ、UENACがアプリケーションの動作に影響を与えない程度の数秒程度の遅延をランダムに付与することで、輻輳を抑制する。提案に基づく端末を実装し、提案の実現性と既存のアプリケーションに影響を与えないことを実証する。さらに、輻輳のモデル化とシミュレーションを通じて、数秒程度の遅延であっても輻輳を抑制可能であることを示す。

またさらに4章では、1.2節の『課題3：輻輳制御がユーザの体感品質低下を招く』を解決するため、体感品質がユーザの主観に大きく左右されることに鑑み、ユーザの心理的側面から体感品質低下の解消を目指す。具体的には、輻輳制御による通信遅延発生時にはユーザの注意を通信遅延から気をそらすための情報を画面に表示することで、ユーザに通信遅延の発生そのものを気づかせない手法を提案する。提案を評価するために、Webアプリケーションを用いた評価環境を構築したうえで、クラウドソーシングを利用した500名規模のユーザ評価実験を実施する。クラウドソーシングによるユーザ評価の結果、提案が体感品質の低下解消に有効であることを示す。最後に5章において本研究の内容を総括する。

第2章 接続設定の煩雑さを解消する M2Mデバイス設定管理技術

本章では、1章1.2節の『課題1：煩雑なM2Mデバイスの接続設定が普及の阻害要因となる』を解決するデバイス設定管理技術を提案する。

2.1 はじめに

近年、様々な機器をネットワークに接続することでスマート社会を実現する、M2Mと呼ばれる通信サービスが注目されている。現在においても、自動販売機の在庫管理、バスやタクシーの運行管理、建設重機の管理等、幅広い分野でM2Mサービスが実現されており、そのデバイス数は2020年に全世界で数百億台に達するとの試算もある[26, 27].

M2Mでは、様々なM2Mデバイスがインターネット等の広域網を介して、サービスを提供するサーバや他のデバイスと通信を行う。そのため、サービス利用前に、M2Mデバイスを広域網に接続する必要がある。標準化団体ETSIによるM2Mの構成の一部を図4に示す[9]。M2Mデバイスを広域網（図4 Access Network）に接続する構成は、各M2Mデバイスが通信モジュール等を備え、広域網に直接接続する構成（図4左）と、既に広域網への接続機能を有するスマートフォンやホームゲートウェイ等をゲートウェイ（図4 M2M Gateway. 以降本論文では、M2M-GWと呼ぶ）とし、このM2M-GWを介して広域網に接続するゲートウェイ構成（図4右）の2つに大別できる。M2Mデバイスには、眼鏡型や時計型等、常時身につけて利用する形状のデバイスや、宅内センサ等、バッテリー駆動のデバイスも多く含まれるため、M2Mデバイスの小型化や省電力化の観点で優れるゲートウェイ構成が主流になると予測されている[28]。さらに、こうしたM2MデバイスとM2M-GWを接続する場合、Bluetooth[12]が業界標準の一つとなりつつある[13]。そこで本章では、ゲートウェイ構成（図4右）においてM2MデバイスとM2M-GWの接続にBluetoothを用いる場面を考える。

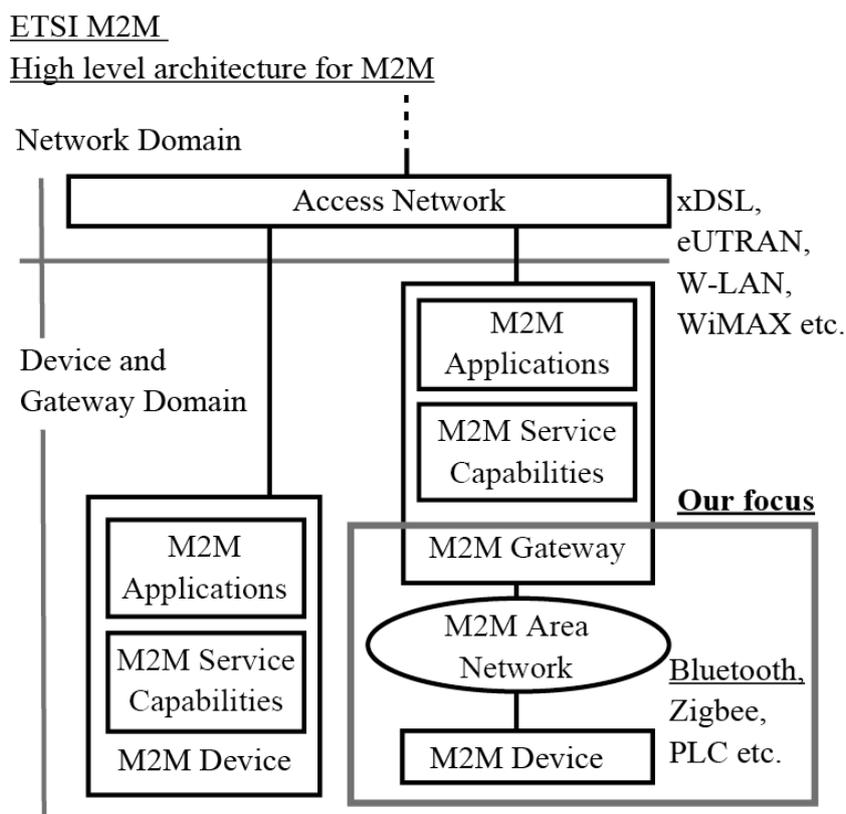


図 4: M2M の構成

Fig.4: M2M Architecture

M2M サービスを利用者に提供するアプリケーション（図 4 M2M Applications や広域網に接続されたサーバ等）やそれらを支えるミドルウェア（図 4 M2M Service Capabilities）が Bluetooth を介して M2M デバイスを利用するため、ゲートウェイ構成では、まず M2M デバイスと M2M-GW 間の Bluetooth の接続設定を利用者自身が実施する必要がある。本章では、この接続設定に注目する¹。

M2M デバイスの中には認証を不要とすることで、接続設定そのものが省略可能なものも存在するが、M2M デバイスの使用者を限定する必要がある等、接続に認証が必要な機器の場合には、利用者自身による設定操作が必要となる [29]。設定操作には、M2M デバイスと M2M-GW を操作し、設定機能呼び出した後に文字入力する、設

¹Bluetooth の接続設定後、UPnP (Universal Plug and Play) [18] や SOAP (Simple Object Access Protocol), LLTD (Link Layer Topology Discovery) [19] 等を用いることで、同じ M2M-GW に接続された他の M2M デバイスの発見（図 4 M2M Area Network に接続された他の M2M デバイス）や、M2M デバイスが提供する機能の発見（サービス発見）が可能となる。本章では、こうしたデバイス発見やサービス発見の前提となる接続設定の部分に注目する。

定用プログラムを同時に起動する等がある。M2M デバイスと M2M-GW の数が増加するに従い、このような設定操作が利用者に求められる回数も増加し、利便性が低下する。設定操作の改善は、現在も活発に研究開発が進められており [20]、利用者の直感的な操作で設定操作が完了する技術 (spontaneous association) の実現が求められている。

従来、多数の接続設定手順が研究開発されている [30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37]。個々の M2M デバイスと M2M-GW の接続設定の簡素化に着目した従来研究 [30, 31, 32, 33] では、M2M デバイスと M2M-GW の組合せ毎に利用者自身による接続設定のための機器操作が必要となり、M2M デバイスの数が爆発的に増加した場合には、必要となる操作の回数も膨大となるという課題がある。また、宅内や会議室など場所毎に、その場所に設置された機器への接続を制御、管理するサーバを設置することで個別の設定操作を不要とする技術 [34, 35] がある。さらに、管理サーバを設けずに、同一 LAN 内にある M2M-GW に接続された M2M デバイスであれば、個別の設定操作なしに、他の M2M-GW から M2M デバイスの利用を可能とする技術 [36] がある。しかしながら、M2M デバイスと M2M-GW の組合せや、それが利用される場所が動的に変わる場合には対応できないという課題がある。また、M2M デバイスの接続をインターネット等の広域網に設置されたクラウドに一旦終端し、クラウド経由でアプリケーションを実行する技術 [37] がある。しかしながら、直接接続される M2M デバイスと M2M-GW の組合せが変わる場合には、都度、接続設定が必要となるという課題がある。

そこで、M2M デバイスと M2M-GW の組合せや、それらが利用される場所が動的に変わる場合であっても、接続設定の煩雑さを解消することを目的にデバイス設定管理技術を新たに提案する。提案技術では、通常、接続設定を行った M2M デバイスと M2M-GW のみが内部に有する接続情報を、複数の M2M-GW がネットワークを介して共有することで、2 台目以降の M2M-GW の接続設定手順を省力化する。利用者はあらかじめ接続情報の共有を行う M2M-GW の組を定義し (以降、通信設定を共有する複数の M2M-GW からなる集合を本章ではグループと呼ぶ)、このグループ内でシームレスな接続設定の切替えを行うことで、接続設定の煩雑さの解消を目指す。提案技術による接続設定に必要な時間を確認するため、市販の Bluetooth デバイス (M2M デバイスに相当) と Android 端末 (M2M-GW に相当) とを用いて提案技術を実装す

る。さらに、提案技術の受容性を確認するため、一般の利用者 380 名を対象に、提案のコンセプトデモを実施し、アンケートによる調査を実施する。

2.2 想定環境と目的および要件

本章において想定する環境と提案の目的、目的達成のために提案が満たすべき要件について述べる。

2.2.1 想定する M2M ネットワーク環境

M2M-GW に、スマートフォンやホームゲートウェイなど、通信キャリアから提供されるインターネットに接続可能な機器を想定する。また、M2M デバイスには、接続に認証やセキュリティ設定が必要な Bluetooth デバイスを想定し、家電量販店等で利用者自身が購入することを想定する。M2M サービスを利用するため、利用者は、M2M デバイスを Bluetooth により M2M-GW に接続する。また、M2M デバイスを中継する M2M-GW は動的に変更され、M2M デバイスが利用される場所も変化する。

図 5 とともに想定環境について述べる。例えば、家族で共有されている M2M デバイスであれば、その M2M デバイスを家族の誰かが実際に使用するタイミングで、M2M デバイスを使用する家族が個人所有するスマートフォン（M2M-GW）に接続する必要がある（図 5 左の M2M-GW に接続されていた M2M デバイスが、図 5 右の M2M-GW に接続先が変更される）。また例えば、個人で複数台の M2M-GW（スマートフォンとタブレット、モバイルルータなど）を所有している場合、M2M デバイスと M2M-GW の使用状況に応じて、M2M デバイスの接続先が変更されることがある。こうした接続先の変更は、宅内など決まった場所で発生するとは限らず、通勤時や外出先で発生する場合もありえる。接続設定後、M2M-GW で動作するアプリケーション（図 4 M2M Applications）やミドルウェア（図 4 M2M Service Capabilities）が、接続された M2M デバイスを用いたサービスを提供する。本章では、この接続設定の煩雑さに注目する。

2.2.2 提案の目的

M2M デバイスと M2M-GW の内部には接続設定により、M2M デバイスと M2M-GW が一意に識別可能なアドレス（Bluetooth Device Address, BD アドレス）を含

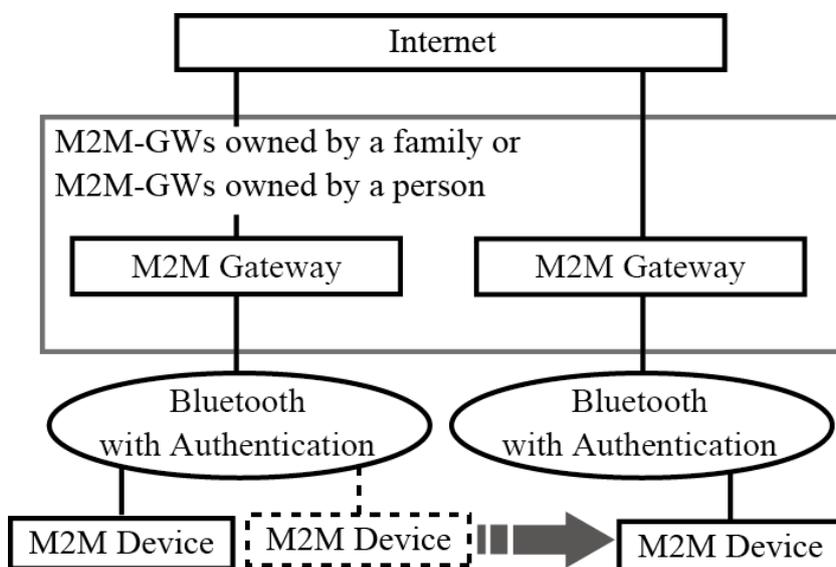


図5: 本章における想定環境

Fig.5: Typical Environment

む設定情報（設定ファイル）が動的に生成される。この設定ファイルは、Bluetoothで直接通信を行う M2M デバイスと M2M-GW の組毎に異なるため、M2M デバイスと M2M-GW の組合せ毎に利用者による接続設定が必要となる。本章では、こうした M2M デバイスを共有する M2M-GW 間の接続設定において、2 台目以降の M2M-GW の接続設定に着目し、この接続設定手順の変更による利便性の向上を目的としている（図5において、図5左に接続されていた M2M デバイスを未設定の図5右の M2M-GW に接続する場面における接続設定手順の変更）。また同時に、1 人の利用者が複数台の M2M-GW を保有する場合においても同様に、2 台目以降の接続設定手順の変更による利便性の向上を目的としている。

2.2.3 実現を目指す動作シナリオ

提案により実現を目指す動作シナリオを図6とともに整理する。説明のため、2つのグループ（図6 Group A, 図6 Group B）を仮定する。

例えば家族など、あるグループ（仮に図6 Group A）で共有される M2M デバイスが複数存在し（図6 (A), (B), (C), (D)）、そのグループ内に M2M-GW も複数存在する（図6 (1), (2)）とする。従来であれば、接続設定を実施した M2M-GW と M2M デバイスのみが図6 M2M Area Network を構成し、通信可能となる。M2M-GW と M2M

デバイスの組合せが変わる場合には、組合せが変わる毎に接続設定が必要となる。具体的には、図6 M2M-GW (1) と接続設定された M2M デバイス (A), (B), (C) のうち、M2M デバイス (C) を新たに M2M-GW (2) に接続する場合 (図6 ①の移動) や、図6 M2M-GW (2) に接続設定された M2M デバイス (D) を新たに M2M-GW (1) に接続する場合 (図6 ②の移動) には、その都度、利用者が接続設定を実施する必要があった。本章では、こうした M2M-GW と M2M デバイスの組合せの変更 (図6 ①の移動や図6 ②の移動) の接続設定における利便性の向上を目的としている

M2M-GW にはスマートフォン等の可搬型の機器と、ホームゲートウェイ等、通常固定された機器とが存在する。今、あるグループ (図6 Group A) 内の可搬型 M2M-GW (2) と M2M デバイス (C) が他のグループ (図6 Group B) の通信圏内に移動したとする。M2M-GW (2) の所有者が移動先のグループにも所属している (例えば、図6 Group A が家族で、図6 Group B がホテルの宿泊者とする) と、M2M-GW (2) の所有者は、ホテルの宿泊時には Group B にも所属することとなる) 場合、移動先の M2M デバイス (E) を M2M-GW (2) に接続すること (図6 ③の移動) や、移動先の M2M-GW (3) に M2M デバイス (C) を接続する (図6 ④の移動) 利用形態が考えられる。

前者 (図6 ③の移動) は、例えば、ホテルが宿泊者向けのサービスの一環として、ホテルの部屋に Bluetooth デバイスを置き、宿泊者に自由に利用してもらう場面がこれにあたる。この場合、M2M-GW (2) における接続設定が必要であり、すなわち、その設定を行うのは利用者自身となる。利用者の接続設定における利便性の向上が本章の目的であるため、図6 ③の移動は本章の対象である。

一方 (図6 ④の移動) は、例えば、ホテルにオーディオシステム (M2M-GW (3)) とスピーカ (M2M デバイス (F)) が備え付けられているにも関わらず、宿泊者が (ホテルに設置されているスピーカではなく) 自身が持ち込んだ可搬型の Bluetooth スピーカ (M2M デバイス (C)) で音楽を聴く場面がこれにあたる。この場合は、M2M-GW (3) における接続設定が必要となり、すなわちその設定を行うのはホテル側となる。ホテル側が実施する接続設定 (図6 ④の移動) は本章の対象外とする。

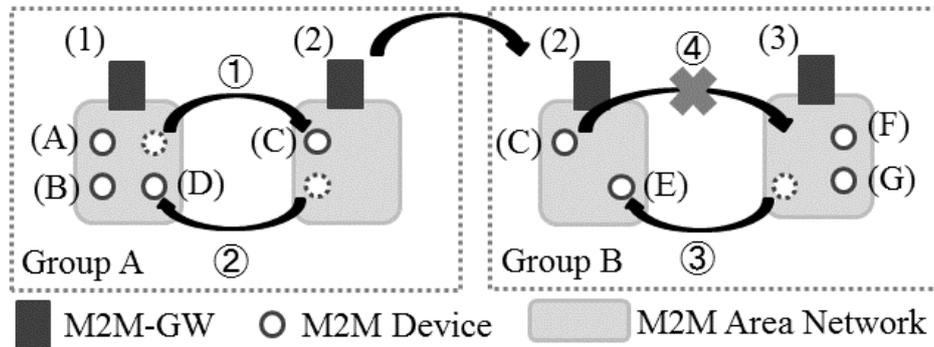


図6: M2M-GW と M2M デバイスの移動

Fig.6: Mobility of M2M-GW and M2M Device.

2.2.4 目的達成のために提案が満たすべき要件

上記の想定環境および目的のため、M2M デバイスと M2M-GW 間の接続設定技術が満たすべき5つの要件について以降で示す。

(要件1) 利用者による明示的な動作が少ない

ここで利用者による明示的な動作とは、接続設定に関する設定機能の起動や文字入力の手間を指す。M2M サービスの普及を想定した場合、認証やセキュリティが必要なデバイスであっても、接続設定の必要性すら利用者が認知不要な方式が望ましい。

(要件2) 既存の M2M デバイスとの下位互換性

Bluetooth デバイスは全世界で年間 20 億台の機器が出荷されており [27]、普及を考えた場合、新たに提案する接続設定技術は、こうした出荷済みの M2M デバイスを考慮することが望ましい。一方、既に出荷済の M2M-GW との下位互換性は、通信キャリアが広域網を通じた M2M-GW のファームウェア更新の仕組みを有している場合が多く [38, 39]、出荷済みの M2M-GW への機能追加が可能なため、考慮不要とする。

(要件3) 通信設定は利用者が意図した機器のみ

誤って利用者の意図しない M2M デバイスと利用者が所有する M2M-GW との接続設定が実施された場合、通信の機密性等が確保されない可能性がある。

(要件4) 通信設定に必要な時間は十分に短い

実用性を考慮した場合、通信設定に要する時間は、利用者が手動で通信設定を実施する場合と比較して、同等もしくは短い時間で完了する必要がある。

(要件5) 提案は利用者に受け入れられること

提案の普及を考慮した場合、利用者にとって提案の必要性や利便性が理解される方式である必要がある。

上記5つの要件を同時に満たす接続設定管理技術の提案が本章の目的となる。

2.3 関連研究

接続設定手順そのものの改善は、現在も活発に研究開発がすすめられている [20]。接続設定手順そのものを改善する手段として、設定対象に接触するだけで接続設定を実施するコンセプトが議論されている [40]。また、人体を媒介し、通信したい機器間の電気信号をやり取りする技術は人体通信やボディエリアネットワークと呼ばれ、こうした接続設定の煩雑さを解消するためにも活用できるとされている [41, 42, 43, 44]。また、NFC (Near Field Communication) タグ [45] 等を用いて機器を近づけることで接続設定を実行する技術や [32, 46]、NFC 等のデバイスに頼らずに機器を物理的に接触させることで接続設定する技術 [30, 47] や、動作によって接続設定する技術 [48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56] が提案されている。またさらに、対象の機器間でキー操作のタイミングを合わせることで接続設定対象の組をシステムが特定する技術 [31, 57, 58, 59] や、こうした操作の使いやすさを評価する研究開発 [33] も進められている。いずれも特定の機器間で、接続設定を手動よりも簡単に実施可能なため (要件3) と (要件4) を満足する。しかしながら、M2M デバイスと M2M-GW の組合せ毎に、利用者自身による接続設定のための操作が必要となり (要件1) を満足しない。また M2M デバイスへの機能やハードウェアの追加が必要となるため (要件2) を満足しない。

宅内や会議室など場所毎に、その場所に設置された機器への接続を管理するサーバを設置することで、接続設定の負荷を軽減する技術 [34, 35] がある。従来研究 [34, 35] では、M2M デバイスが設置、接続された LAN に M2M-GW を接続し、接続管理サーバが個々の M2M デバイスへの接続を制御することで、M2M-GW から任意の M2M デバイスへの接続が可能となる。接続の制御はその場所の管理者が実施する。M2M デバイスの移動がなく機器への接続を管理するサーバとの接続が前提とできる場面においては、設定機会の削減が可能であるため (要件1) から (要件4) を満足する。しか

しながら、本章で想定する、M2M デバイスと M2M-GW の移動を前提とし、またその組み合わせが変更される場合には、対応できず、やはり、M2M デバイスと M2M-GW の組合せ毎に接続設定が必要となるため（要件 1）を満足しない。

さらに、管理サーバを設けずに、例えば Wi-Fi や Ethernet で接続された同一 LAN 内の M2M-GW に接続された M2M デバイスの利用を可能にする技術 [36] がある。同一 LAN 内の M2M-GW で実行される従来技術 [36] が M2M デバイスとの接続を制御することで、任意の M2M デバイスに接続可能となる。そのため（要件 3）と（要件 4）を満足する。しかしながら、従来技術 [36] の使用に、M2M デバイスへの機能追加が必要であり（要件 2）を満足しない。また、M2M デバイスと M2M-GW が利用される場所や M2M デバイスと M2M-GW の組合せが変わり、さらに M2M-GW が同一の LAN に接続されない場合には、その組合せ毎に接続設定が必要となるため（要件 1）を満足しない。

M2M デバイスとの接続をインターネット等の広域網に設置されたクラウドに終端し、クラウド経由でアプリケーションを実行する技術 [37] がある。M2M デバイスが M2M-GW を介してクラウドに接続されることで、他の M2M-GW から任意の M2M デバイスが利用可能となるため（要件 2）と（要件 3）、（要件 4）を満足する。しかしながら、従来研究 [37] の利用には M2M デバイスが M2M-GW を介してクラウドに常時接続されている必要があり、M2M デバイスと M2M-GW の組合せが変わる場合には、M2M デバイスをクラウドに接続するために、その組合せにおいて接続設定が必要となるため（要件 1）を満足しない。

2.4 M2M デバイス設定管理技術の提案

本節では、2.2.1 節に示す想定環境を対象に、2.2.4 節に示す 5 つの要件の全てを同時に満足する、M2M デバイス設定管理技術を新たに提案する。

2.4.1 提案技術の基本方針

M2M デバイスを中継する M2M-GW が変更される場面において、その M2M デバイスを中継する 2 台目以降の M2M-GW の接続設定操作に着目する。従来、通信設定を実施した M2M デバイスと M2M-GW の内部には、M2M デバイスと M2M-GW の BD

アドレスを含む設定ファイルが動的に生成される。この設定ファイルは、Bluetooth で直接通信を行う M2M デバイスと M2M-GW の組毎に異なる。提案では、この設定ファイルを、ネットワークを介して複数の M2M-GW（グループ）で共有可能とし、グループ内でのシームレスな設定の切替えを実現することで、2 台目以降の接続設定手順を変更し、利便性の向上を目指す。

グループ内で通信設定を共有するには、事前にグループを定義する必要がある。グループを定義する負担は、例えば、グループに家族や個人が所有する M2M-GW 群を想定した場合、通信キャリアの顧客情報基盤を利用できる可能性がある。具体的には、日本国内の通信キャリアであれば家族を対象としたスマートフォンや FTTH（Fiber To The Home）の割引サービスを提供しており [60]、利用者の増加が見込まれている [61]。こうしたサービスの利用を前提に、通信キャリアが SIM カードの情報や FTTH の回線番号から家族や個人が所有する M2M-GW 群を特定可能なため、グループを定義する負担が無視できる場合がある。

2.4.2 提案技術による手順

提案では、通信設定の M2M-GW 間での共有を目的に M2M デバイス管理サーバ（以下、M2M-SV と呼ぶ）を新たに導入する。M2M-SV は例えば広域網等、本提案技術を利用する全ての M2M-GW から接続可能な位置に設置される。提案による M2M-GW が内部に持つデータベースの構造を図 7 に本提案手順を図 8 と図 9 に示し、以降に詳述する。

事前準備：1 台目の M2M-GW による操作

本技術を利用する利用者は、M2M-GW（スマートフォン等）を用いて、M2M-SV に接続し、利用者 ID と利用者名、通知用メールアドレス、パスワードとともに利用登録を行う。M2M-SV は利用登録に含まれる情報を自身のデータベースに登録する（図 7 テーブル “User” のエントリが作成される）（図 8 (S1)）。利用登録に使用した M2M-GW には、M2M-SV が M2M-GW 識別のための ID を付与し、利用者 ID と関連付ける。また、登録済みの利用者 ID とパスワードを異なる M2M-GW に入力した場合、その M2M-GW も利用者 ID と関連付けられる（図 7 テーブル “M2M-GW” のエントリが、“User” に対して複数関連付けられる）。

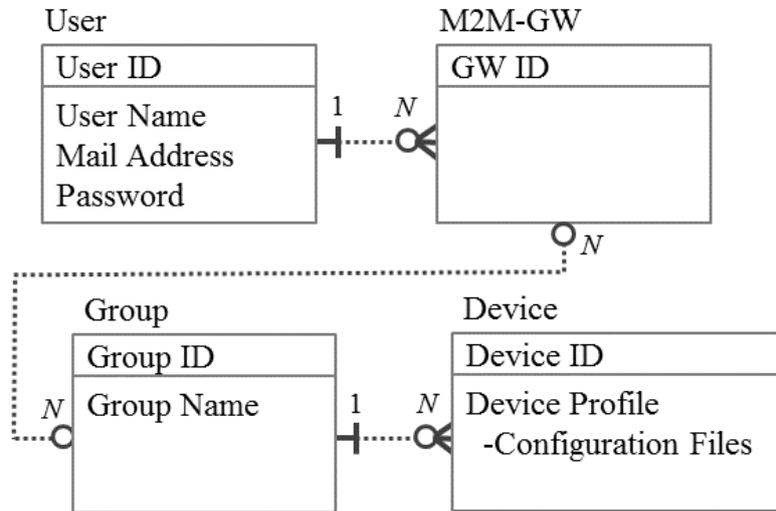


図7: M2M-SV のデータベース構造

Fig.7: Database Architecture of M2M-SV.

利用登録後，利用者は任意にグループを作成することができる．利用者は M2M-GW を操作し，グループの作成要求を M2M-SV に送信する（図8（S2））．グループ作成要求を受信した M2M-SV は，作成要求に対してグループ ID を発行し，グループ ID と作成要求を実施した M2M-GW とを関連付けて保存する（図7テーブル“Group”のエントリが作成される）（図8（S3））．また，グループを作成した利用者は，グループの管理者となり，他の利用者が所有する M2M-GW をグループに招待できる（図8（S4））．グループ管理者から招待を受けた利用者（M2M-GW）には，M2M-SV よりグループへの招待が送付され（図8（S5）），招待を受けた M2M-GW を利用者が操作し，グループへの参加を承認することで，M2M-SV 上で同じグループ ID に関連付けられる（M2M-GW は複数のグループに所属できる）．また，グループ管理者は，グループに属する任意の M2M-GW を指定することで，その M2M-GW を所有する利用者を管理者に追加できる．

接続設定：1 台目の M2M-GW による操作

接続設定を実施する（図8（S6））．本提案においても，グループにおいて初めて接続設定を実施する M2M デバイスと M2M-GW の組においては，既存の接続設定手順が必要となる．利便性を目的に，グループにおいて2台目以降の M2M-GW の接続設

定手順を変更するため、接続設定によって生成される設定ファイルを、同じグループ ID に関連付けられた M2M-GW 間で共有するという点が既存とは異なる。設定ファイルには M2M-GW と M2M デバイスを一意に識別するための BD アドレスが含まれており、これを M2M-GW 間で単純に共有する場合、同じ BD アドレスが通信圏内に複数存在する状況となる可能性が生じる。こうした場合、BD アドレスの重複による通信不可状態となる恐れがあるため、BD アドレスの一意性の確保が課題となる。本提案にて BD アドレスの一意性を確保する対応方法については後述する。

共有準備：1 台目の M2M-GW による操作

設定により M2M-GW の内部に動的に生成された設定ファイルを、M2M-GW 間で共有可能な設定プロファイル（M2M-GW 上の設定ファイルの内容をまとめたもの）とし（図 8（S7））、グループ ID、デバイスを識別するためのデバイス ID とともに M2M-SV に登録する（図 8（S8））。接続設定を実施した M2M-GW に、複数のグループ ID が関連付けられている場合には、設定プロファイルに関連付けるグループ ID の確認が M2M-SV により実施される（M2M デバイスが関連付けられるグループ ID は 1 つのみ）（図 8（S9））。M2M-SV は、M2M-GW より受信した設定プロファイルを、自身のデータベースに保存する（図 7 テーブル“Device”のエントリが作成される）（図 8（S10））。

デバイス検知と自動設定：2 台目以降

M2M-GW が M2M デバイスの通信エリア内に持ち込まれ、M2M デバイスを検知した場合（図 9（S11））、M2M-GW 自身が所属するグループにて M2M デバイスが接続設定済みかを M2M-SV に問い合わせる（図 9（S12））。問い合わせの結果、自身が所属するグループにおいて既に接続設定済みの M2M デバイスであった場合、M2M-SV は設定プロファイルを M2M-GW に応答する（図 9（S13））。設定プロファイルを受信した M2M-GW は、利用者に、検知した M2M デバイスが利用可能となったことを通知し、利用者がその M2M デバイスの利用を求めた場合に設定プロファイルを M2M-GW 自身に適用する（図 9（S14））。以上の手順により、従来、通信設定が M2M-GW と M2M デバイスの組合せだけ必要であったところ、1 台の M2M デバイスに対しグループにおいて 1 回に削減可能となる。

M2M デバイスの接続切替え：2 台目以降

さらに本提案では、ある利用者（M2M-GW1）によって使用中の M2M デバイスを他の利用者（M2M-GW2）に切替える場面も考慮する。具体的には、宅内において、Bluetooth スピーカ（M2M デバイス）を用いて音楽を再生するスマートフォン（M2M-GW）を変更する場面が想定される。変更は、変更先の M2M-GW2 より切替え要求を M2M-SV に送信することで開始される（図9（S15））。切替え要求を受信した M2M-SV は、切替えを行う M2M デバイスと接続中の M2M-GW1 に対し、切替えの実施可否を確認するためのメッセージを送信する（図9（S16））。切替えの実施可否の確認メッセージにおいて切替えの了解が得られた場合（図9（S17））、接続の切替えを実施する（図9（S18）、（S19））。切替えは、接続中の（切替え元の）M2M-GW1 が、M2M デバイスとの接続を切断し、接続先の M2M-GW2 が、該当する M2M デバイスとの接続を新たに開始することで実現される。

後述の実装システムによる画面を図10に例示する。図10は、M2M-GW1 と M2M デバイスは既に接続設定済みであり、未設定の M2M-GW2 から接続を求めるデバイスを選択すると、接続の切替え確認画面が M2M-GW1 と M2M-GW2 にそれぞれ表示される場面を示す（図10における（S15）および（S16）を示す）。M2M-GW1 の確認画面において切替えを了承した場合、M2M デバイスとの接続が、M2M-GW1 から M2M-GW2 に切替る。

本提案を実行する M2M-GW 必要な構成

本提案を実行する M2M-GW は、図10に例示する通り、接続する M2M デバイスを選択するため、ディスプレイやタッチパネル等の入出力インタフェースを備える必要がある。スマートフォン等を M2M-GW とする場合、一般的に入出力インタフェースを備えるため、これを本提案の実行に活用することとなる。一方、例えばホームゲートウェイなど、入出力インタフェースのない M2M-GW の場合には、図10に例示する画面を操作する M2M-GW が別途必要となる²。

²入出力インタフェースのない M2M-GW（ホームゲートウェイ）を設置する場合、入出力インタフェースを有する M2M-GW（家庭内の PC など）を介してホームゲートウェイの設定を行うことが一般的である。したがって、図10に例示する画面を操作する M2M-GW の存在を別途想定することは特殊な状況ではない。

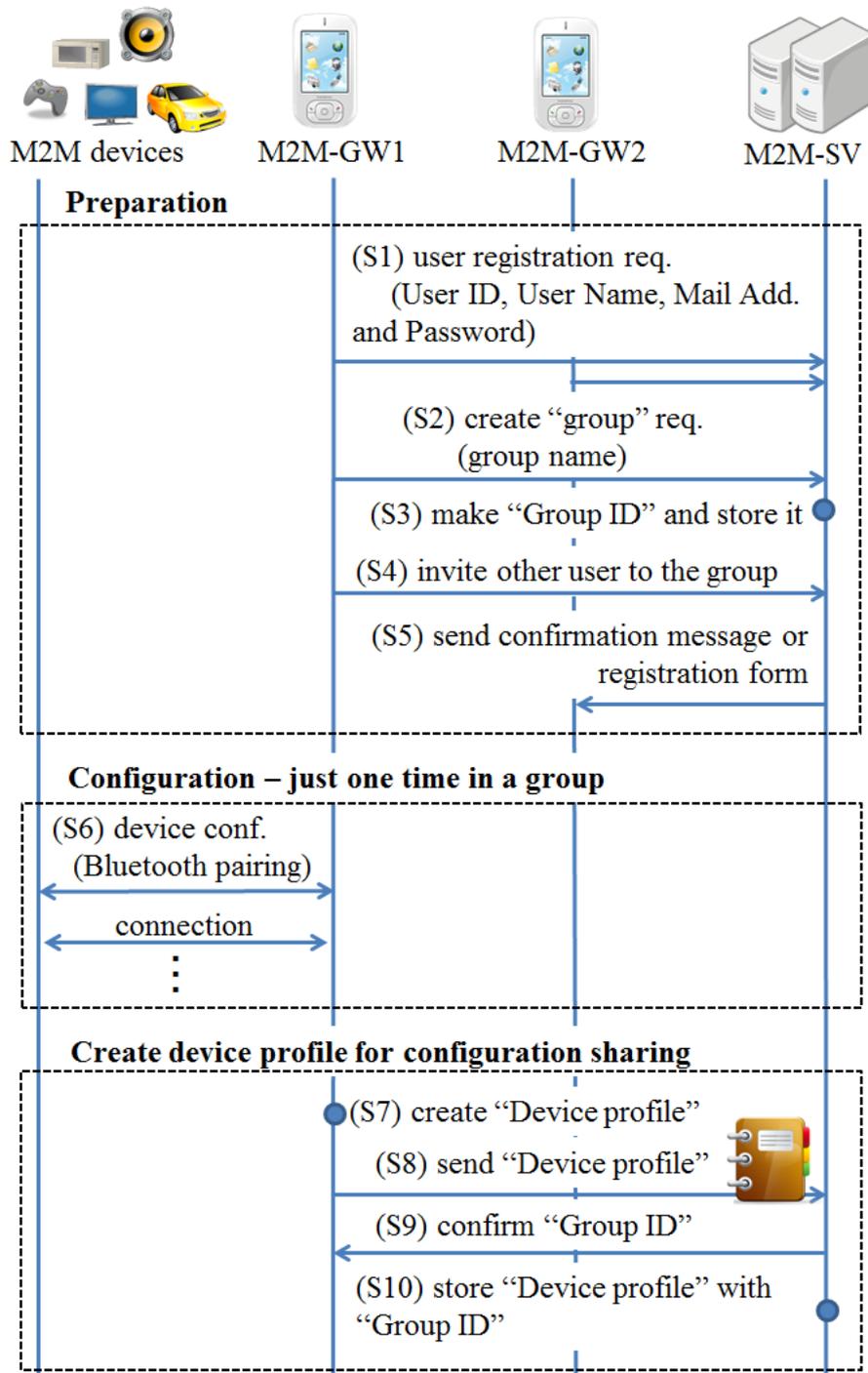


図 8: 設定管理処理シーケンス (事前準備)

Fig.8: Configuration Management Sequence (Preparation).

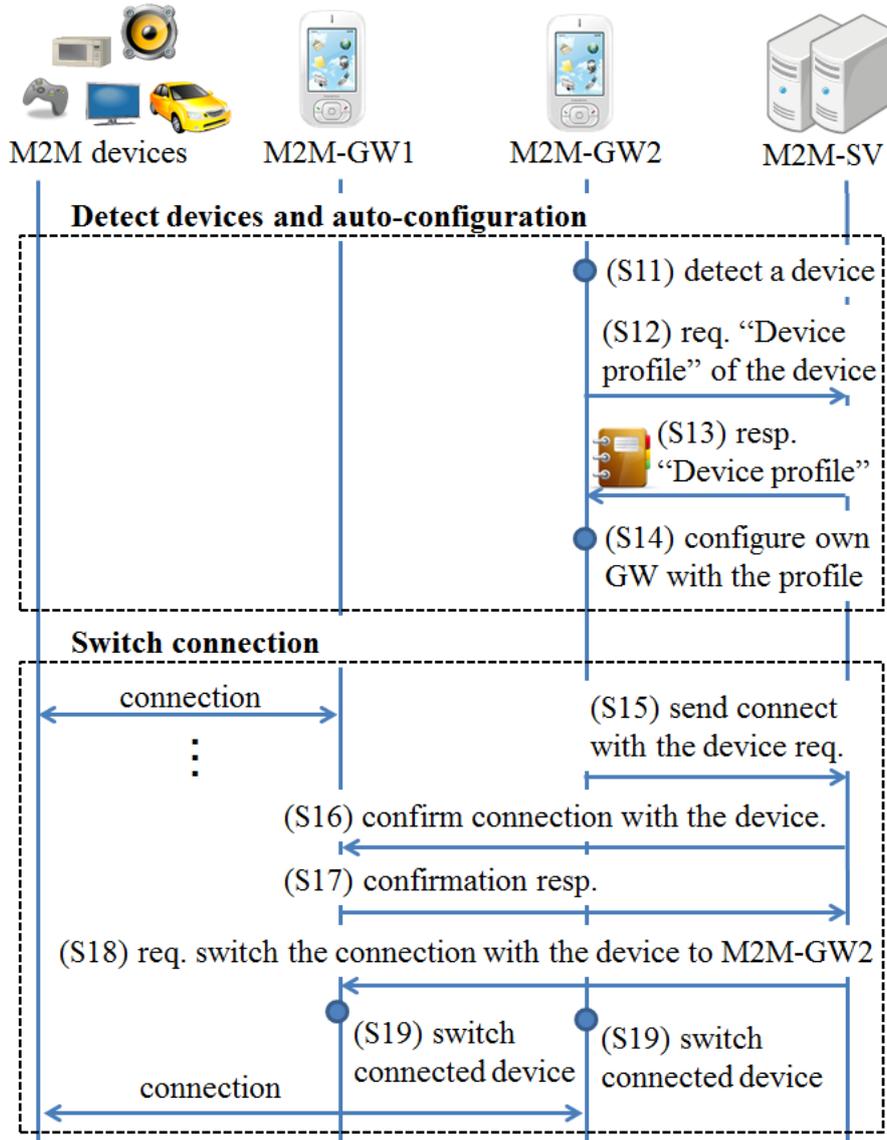


図9: 設定管理処理シーケンス (デバイス検知と接続切替)

Fig.9: Configuration Management Sequence (Detect and Switch Connection).



図 10: 提案システムによる画面表示の例

Fig.10: Samples of Display on Proposed System.

BD アドレスの一意性の確保

設定ファイルには M2M-GW と M2M デバイスを一意に識別するための BD アドレスが含まれている。したがって、上述の接続の切替えのために、当初 M2M-GW1 にあった設定ファイルを M2M-GW2 にコピーした場合、通信圏内に同じ BD アドレスを持つ M2M-GW が同時に複数存在する状況が発生する可能性がある。具体的には、同じ空間に M2M-GW1 と M2M-GW2 が存在し、さらに、M2M-GW1 により接続された複数の M2M デバイスがあるとする。この M2M デバイスの中の一部について、その接続設定を M2M-GW2 に単純にコピーした場合、M2M-GW1 の BD アドレスが空間に複数存在することとなり、通信不可となる。本提案ではこうした状況を回避するため、M2M-GW の BD アドレスの一意性を確保する仕組みを導入する。図 11 とともに提案を示す。

本提案を実装する M2M-GW は、接続設定（図 8 (S6)）を実施する際、M2M デバイス毎に、専用の BD アドレスを生成し、その BD アドレスを持つ仮想インタフェースを M2M-GW 内部に作成する（図 11 左、デバイス毎に専用の BD アドレスを持つ仮想インタフェースを M2M デバイスの数だけ M2M-GW は持つ）。接続設定に、この仮

仮想インターフェースを用いることで、M2M-GW と M2M デバイスの内部に生成される設定ファイルには、その M2M デバイスと通信するために仮想インターフェースに割り当てた専用の BD アドレスが保存されることとなる。また、M2M-GW が生成する BD アドレスには、あらかじめ十分なアドレス空間を予約し、その中からランダムに割り当てることで、生成する BD アドレスの衝突を回避することとし、同一グループ ID 内では仮想インターフェースの BD アドレスの衝突が無いように、M2M-SV が制御する。さらに、切替えの際には、切替え対象の M2M デバイスと通信するための専用の BD アドレスを含む仮想インターフェースそのものを切替える。この際、仮想インターフェースをどの M2M-GW が使用するかは M2M-SV が管理する。

本提案の仮想インターフェースのアドレス空間として1つの OUI (Organizationally Unique Identifier) を割り当てた場合を例に、収容可能なデバイス数を具体的に示す。OUI は製造者を識別するために用いられ、1つの製造者が複数の OUI を持つ場合もある。ここで、本提案に1つの OUI を割り当てるとは、(複数の OUI を持つ製造者と比較して小規模な) Bluetooth デバイスの製造者が1つ追加されることと同程度の BD アドレス空間の消費となる。1つの OUI により、24bit のアドレス空間が利用可能となり (BD アドレスは、OUI の 24bit と、製造者が割り当てる 24bit から構成される)、一部の予約アドレスを除き、約 1677 万個のアドレスが利用可能となる。本提案では、同一のグループ ID 内で、仮想インターフェースに割り当てる BD アドレスの重複を避けるため、グループ毎に約 1677 万個の M2M デバイスが収容可能となる。本提案で通信圏内 (Bluetooth の通信圏内。Class 2 の Bluetooth デバイスの場合、約 10m.) に偶然同じ BD アドレスを使用する仮想インターフェース (M2M-GW) が存在した場合、重複した BD アドレスを使用する仮想インターフェースの通信が失敗することとなる。必要となる通信の信頼性と想定される M2M-GW の物理的な密度に応じては、本提案のために割り当てる OUI の数を2つ以上とする必要がある。

なお、M2M-GW にスマートフォンを想定した場合、提案の実装に管理者権限が必要な機能が要求される。こうした管理者権限が必要な機能の実行には、通信キャリアや M2M-GW の開発事業者による M2M-GW への API 追加が必要となる。

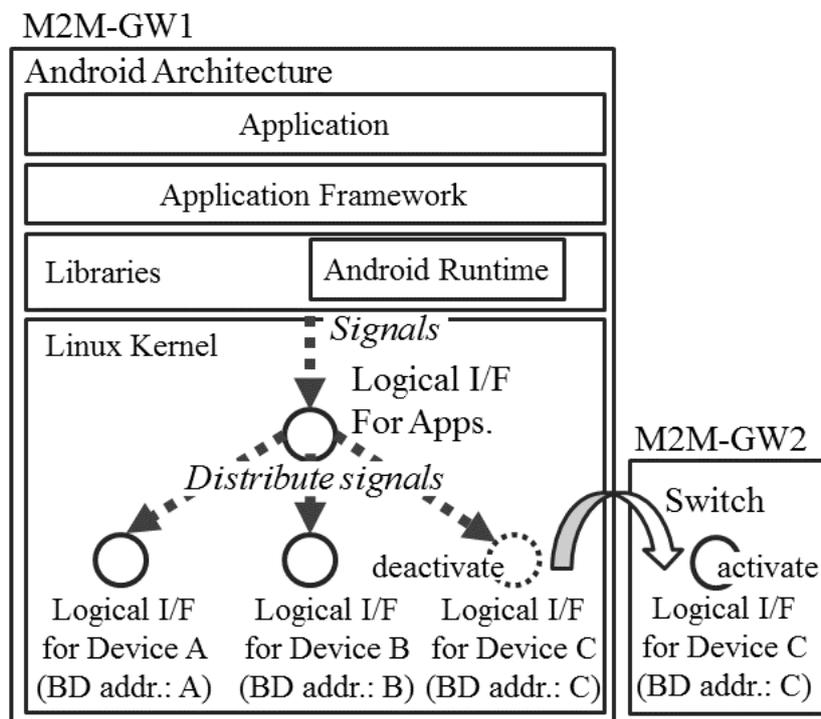


図 11: BD アドレスの一意性を確保する M2M-GW における Bluetooth ペアリング機能の拡張

Fig.11: Extension of Bluetooth Paring Function on M2M-GW to Keep Uniqueness of BD Address.

2.4.3 提案技術の有効性

以上より本提案は、グループにおける最初の1回（接続設定：1台目の M2M-GW による操作。図8（S6）。既存の接続設定手順）を除き、2回目以降には、M2M デバイスの利用のため、接続設定のための設定機能の起動や文字入力の手間を要求しない（デバイス検知と自動設定：2台目以降。図8（S11）以降の操作において、既存の接続設定手順の実行を、本提案では要求しない）。そのため、本提案は（要件1）を満たす。

また、本提案は、既存の M2M デバイスの変更なく、M2M-GW への機能追加と M2M-SV の導入により実現される。具体的には、2.4.2 節に詳述する本提案手順において、M2M デバイスと M2M-GW との間で発生する手順は、既存の接続設定手順（図8（S6））と通信のための接続のみであり、M2M デバイスの変更を必要としない。そのため、本提案は（要件2）を満たす。

さらに、通信設定が実施されるのは、あらかじめグループとして設定された M2M-GW 間のみとなる。具体的には、共有準備（：1台目の M2M-GW による操作）において、事前準備（：1台目の M2M-GW による操作）にてあらかじめ利用者により作成されたグループ ID を用いることで、通信設定が実施される M2M-GW を、利用者が指定する。そのため、本提案は（要件3）を満たす。（要件3）については、グループの管理者となる利用者の設定負担の増加が懸念されるが、例えば、利用者が、通信キャリアによる複数の M2M-GW に対する割引サービスを利用している場面において、契約情報と M2M-GW が備える SIM や回線番号を用いることにより、M2M-GW のグループの管理負担を軽減できる。さらに、手動によるグループ管理より確実にグループが管理される。

以上、本提案は（要件1）から（要件3）を満足する。さらに、本提案が（要件4）を満足することを確認するため、市販の Android 端末を用いた M2M-GW の実装を行う。

2.5 提案による接続設定時間の評価

提案による接続設定時間が十分短い（要件4）ことを確認するため、M2M-GW を実装し、市販の Bluetooth デバイス（M2M-デバイス）を対象に、接続設定に必要な

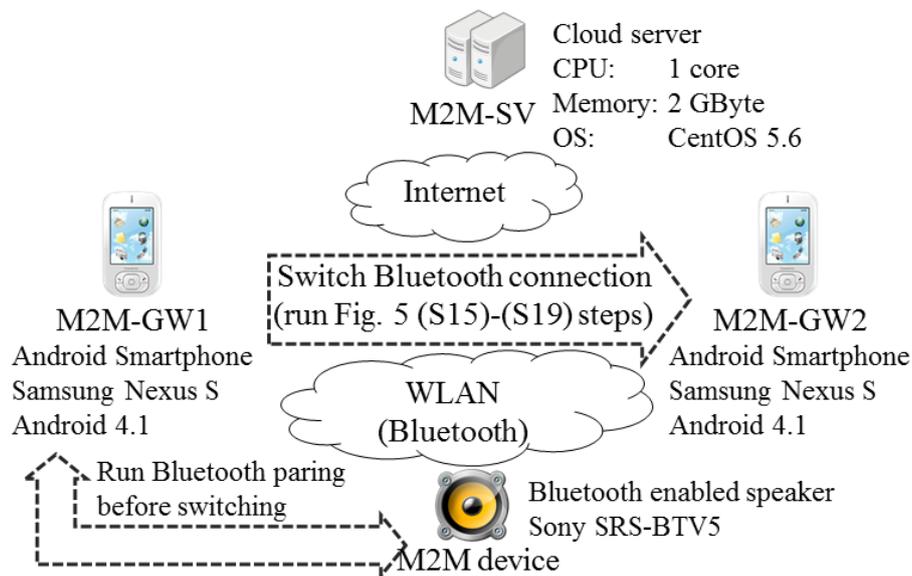


図 12: 実装と動作確認環境

Fig.12: Prototype System and Evaluation Environment.

時間を確認する。確認は、実装システムを用いて、接続設定済みの M2M-GW から未設定の M2M-GW に接続設定を切替える動作を実行し、切替えに必要な時間を計測することで行う。実装と確認を実施する環境を図 12 に示す。M2M デバイスには、市販の Sony 社製 Bluetooth 対応スピーカをそのまま使用する。また、M2M-GW には Samsung 電子社製スマートフォン（Android 4.1, Samsung Nexus S）を、M2M-SV にはインターネット上のクラウドサーバを用いる。

実装システムを用いて、設定済みの M2M-GW1 の接続設定を無効化し、切替先である未設定の M2M-GW2 に接続設定を新たに実施する切替え動作を実行する（図 9 (S15) から (S19)）。切替えのため前述の事前準備に記載の各手順を実施する。本確認では、M2M-GW1（図 12 左）と M2M-GW2（図 12 右）を同一のグループに登録する。また、切替え前に、M2M デバイスと M2M-GW1 の間の Bluetooth の接続設定を実施する。接続設定実施後、M2M-GW1 は Bluetooth の設定に関わる OS 内部の各種設定ファイル（Bluetooth の場合、使用する Bluetooth プロファイルにより、設定ファイルが異なる。本検証に使用した Bluetooth スピーカの場合、M2M-GW 内部の 11 個の設定ファイルに値が書き込まれる）をまとめて設定プロファイルとし、M2M-SV にアップロードする。

通信設定の切替えに必要な時間を計測する。M2M-GW1 (図 12 左) に接続された M2M デバイス (図 12 中央下) を、本実装機能を用いて M2M-GW2 (図 12 右) に切替える。計測結果を図 13 に示す。なお、切替え中の画面については、図 10 に前述している。切替えは、設定プロファイルに含まれる 11 の設定ファイルの書換え (書換えは設定ファイル毎に順に実施する。各ファイルの書換えに必要な時間を図 13 (T1) から (T11) に示す) と、M2M-GW1 が M2M デバイスとの接続設定に使用した BD アドレスを M2M-GW2 に反映するため bluetoothd (Bluetooth を管理するデーモンプログラム) の再起動 (図 13 (T12)) が実施される。本実装では、簡単化のため、複数の M2M デバイスと M2M-GW の組が通信圏内で切替る場面においても、BD アドレスの一意性を維持する仮想インタフェースの機能を用いずに、M2M-GW の BD アドレスそのものを変更する実装とした。図 13 より、切替えに必要な時間は、合計で 6.43 秒であり、もっとも時間の必要な処理は bluetoothd の再起動であることが確認された。これは、一般に使用されている Bluetooth の接続設定 (ペアリング) に必要な時間を実験的に求めた結果 (実験において最も短い結果を示した手法で平均 7.23 秒) [62] と比較しても同等以上となっており、本提案が (要件 4) を満足することが実装を通じ確認された。

以上、本提案が (要件 1) から (要件 4) を同時に満足することを示した。本提案により、従来、M2M デバイスと M2M-GW の組合せ数分必要であった接続設定が、グループにおいて M2M デバイス毎に 1 回に削減され、グループにおける 2 回目以降の利用者による接続設定の負担を大幅に削減できる。さらに、本提案の普及を考慮した場合、利用者にとって提案の必要性や利便性が理解される方式である必要がある (要件 5)。そこで、次章において、一般の利用者を想定したアンケートを通じ、受容性を確認することで、本提案が (要件 5) を満足することを示す。

2.6 アンケートを通じた受容性の確認

例えば、複数の利用者でグループを構成した場合、各利用者が所有するスマートフォンがグループ内の M2M-GW として扱われることになる。このグループに対して、本提案を適用した場合、グループ内において最初にデバイスを使用する利用者が自身のスマートフォン (M2M-GW) と M2M デバイスとの接続設定を実施した後、グルー

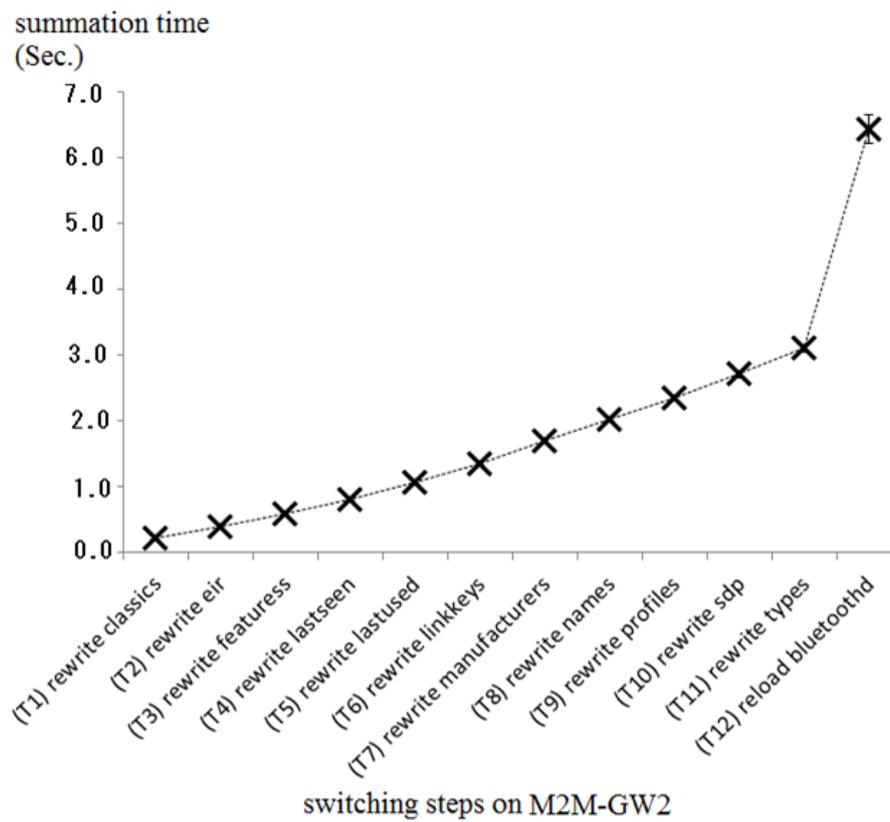


図 13: M2M デバイスの接続切替時間

Fig.13: Result of Switching Time of M2M Device.

プ内のその他の利用者が、自身のスマートフォンでその M2M デバイスとの接続設定を実施する必要はない。その際、グループ内で2人目以降（接続設定を実施した利用者以外）の利用者にとって、自身のスマートフォン（M2M-GW）に対して、本提案が自動的に接続設定することとなる。この自動的にスマートフォンに接続設定される点について、一般の利用者が不快に感じる可能性が懸念される。そこで、グループ内で2台目以降の M2M-GW の利用者を想定し、M2M-GW に自動的に接続設定が実行される様子を模したコンセプトデモを、一般の利用者 380 名に対して実施する。さらに、アンケート調査を行い、システムが自動的に接続設定を行うことに対する受容性を確認する。

2.6.1 コンセプトデモの概要

コンセプトデモの概要を図 14 とともに示す。コンセプトデモは一般向けの展示会（日経 BP 社主催，ITPro EXPO 2013，2013 年 10 月 9 日～10 月 11 日，東京ビッグサイトにて開催，来場者合計 64,717 名）[63]にて実施する。

コンセプトデモは、2つのエリアに分かれる。一方は、自宅を模したエリア（図 14 左）、もう一方はホテルを模したエリア（図 14 右）となっている。各エリアには、表 2 に記載の機器（M2M デバイス）が設置され、スマートフォン（M2M-GW）から M2M デバイスの操作が可能な状況を再現している。デモの参加者は、まず自宅を模したエリアに入る。自宅を模したエリアに設置された M2M デバイスと M2M-GW とは既に通信設定が完了しているものとし、自宅にある M2M デバイスと M2M-GW は全て同じグループに属しているものとする。ここで、デモ参加者は、M2M-GW（スマートフォン）から各 M2M デバイスを任意に操作する（操作のカスタマイズもできる）。その後、デモ参加者はホテルを模したエリア（図 14 右）に移動する。ホテルを模したエリアには、自宅を模したエリアと同様に M2M デバイスが設置されている。本コンセプトデモでは、ホテルのチェックインと同時に、ホテルにある M2M デバイスが属するグループに、デモ参加者の M2M-GW（スマートフォン）が自動的に追加される。これは、デモ参加者がチェックイン時にホテルの宿泊会員となり、その結果、宿泊会員のスマートフォンがホテルの M2M デバイスと同一グループに関連付けられた状況を再現したものである。

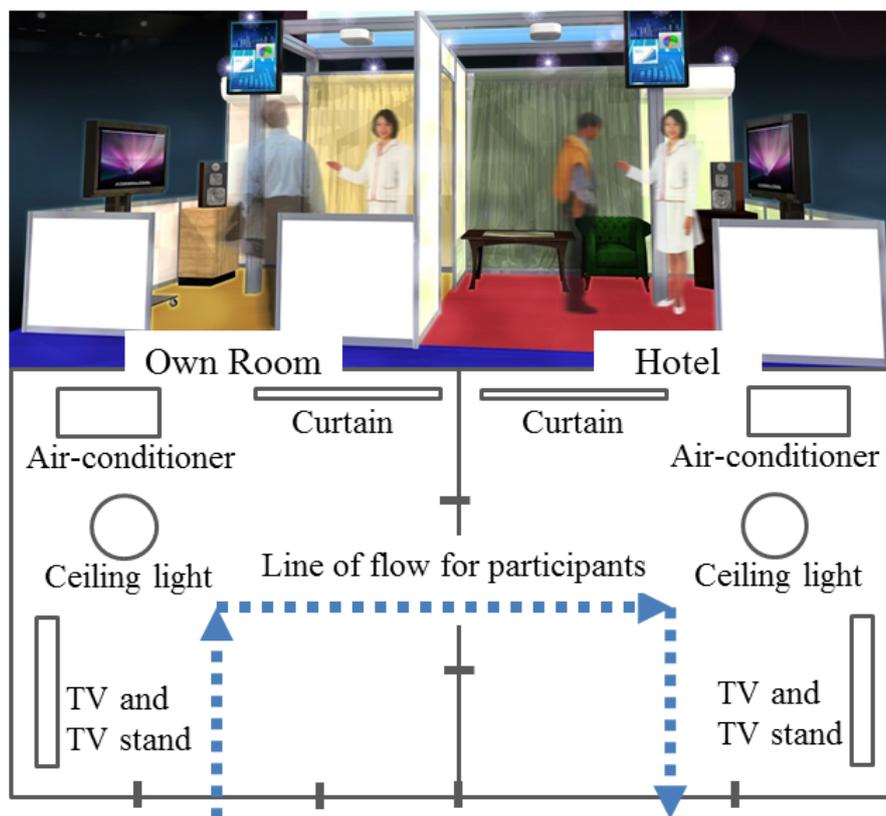


図 14: コンセプトデモの展示イメージと見取り図
 Fig.14: Floor Plan of Demonstration of Concept.

表 2: コンセプトデモに用いた機器とその機能
Table2: List of Device and its Function for Demonstration.

機器	操作
エアコン	設定温度, 風向き, 風量等
テレビ	チャンネル, 電源等
テレビ台	高さ
照明	照度, 色合
カーテン	色 (プロジェクターによる投影)

ホテルを模したエリアに入室後, ホテルにある M2M デバイスが同じグループのデバイスであるため, 本提案技術により, 通信設定が自動的に M2M-GW に設定される。その後, デモ参加者は, M2M-GW (スマートフォン) からホテルにある各 M2M デバイスを任意に操作できる。なお, 今回のコンセプトデモでは, 設定プロファイルの相互利用の可能性についての調査も兼ね, 自宅で操作した内容が, スマートフォンを通じて反映される (自宅でカスタマイズした照明やエアコンの状態がホテルに反映される) ようになっている。

2.6.2 デモ参加者へのアンケートの実施

本提案技術の受容性を確認するため, コンセプトデモの参加者 380 名に対し, 表 3 に記載のアンケートを実施した。一部の参加者はアンケートへの回答が未記入であったことから, 有効回答数は 358 名分であった。図 15 に (質問 1) の回答結果を示す。全有効回答の 91.6% が本提案技術によるサービスが “非常に有用” または “まあまあ有用” と回答しており, 本提案技術が一般の利用者にとって有用なものであることを示す結果となった。

また, その理由を確認する (質問 2) の回答結果を図 16 に示す。その結果, “自動化により, 新サービスへの期待が高まる (42.7%)”, “設定の労力が減る (30.5%)” と, 本提案が多数の方に受け入れられるものであることがアンケート調査を通じて明らかとなった。なお, 本技術に対し, 有用性が無いと感じた ((質問 1) において “あ

表3: アンケートとその回答項目
Table3: Questions and Answers of Demonstration.

質問	回答
(質問1) コンセプトの有用性について どのように感じますか	1. 非常に有用 2. まあまあ有用 3. あまり役に立たない 4. 全く役に立たない
(質問2) (質問1)において, "1." または "2." を選択した方は, その理由を 教えてください (複数回答可)	1. 設定の労力が減る 2. 体が不自由な人に便利 3. 自動化により, 新サービスへの期待が高まる 4. その他
(質問3) (質問1)において, "3." または "4." を選択した方は, その理由を 教えてください (複数回答可)	1. 役立つサービスが無い 2. セキュリティが不安 3. 設定が楽にならない 4. 現実との乖離がある 5. 内容が理解できない 6. その他

まり役に立たない”, “全く役に立たない”と回答した) 参加者にその理由を確認する (質問3) の回答結果を図17に示す. その結果, “現実との乖離がある (45.6%)”, “セキュリティが不安 (21.5%)” となり, 実現性に対し懐疑的に感じた参加者や, 自動で設定されることに対するセキュリティ面での不安を感じた参加者の割合が多い結果となった.

アンケート調査の結果, 本提案は多くの方が有用であることを認めたことから, 受容性が確認された. これにより, 本提案が (要件1) から (要件5) の全てを同時に満足することを示した. 具体的には, 提案が (要件1) から (要件3) を満足することを示した. また, (要件4) については, 実装を通じ, 提案が満足することを示した.

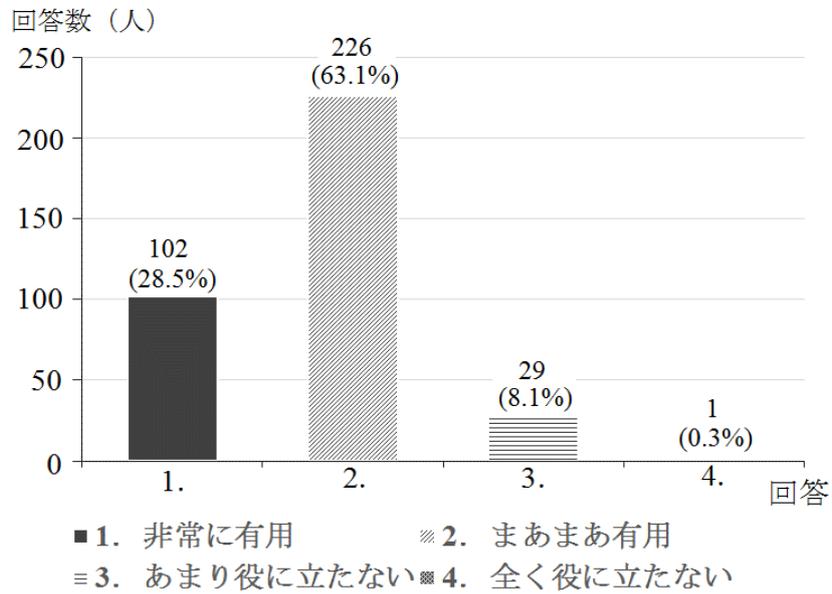


図 15: (質問1) への回答結果

Fig.15: Result of Answer for Q. 1.

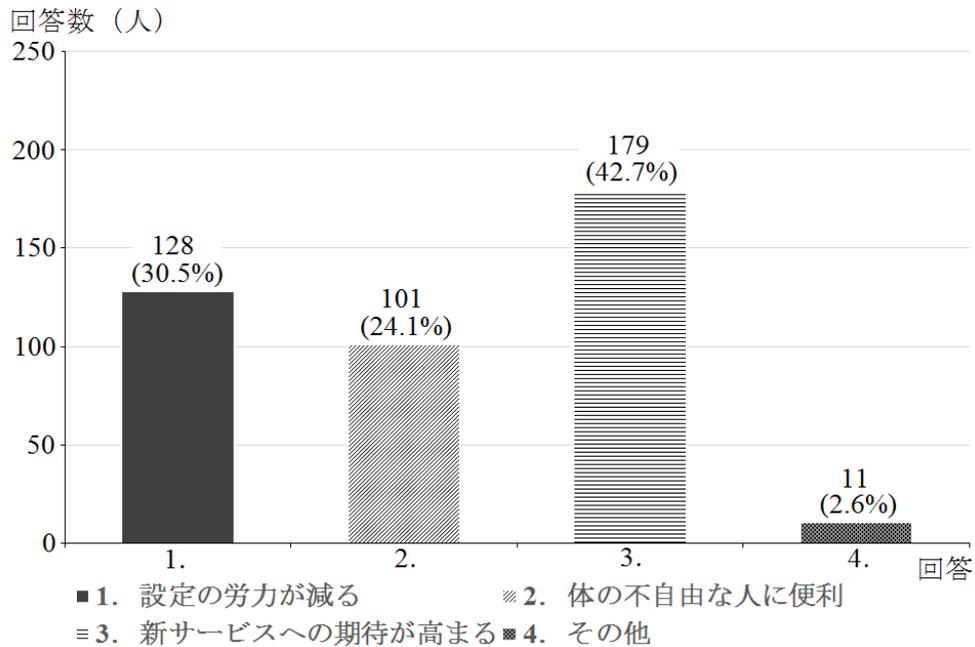


図 16: (質問2) への回答結果

Fig.16: Result of Answer for Q. 2.

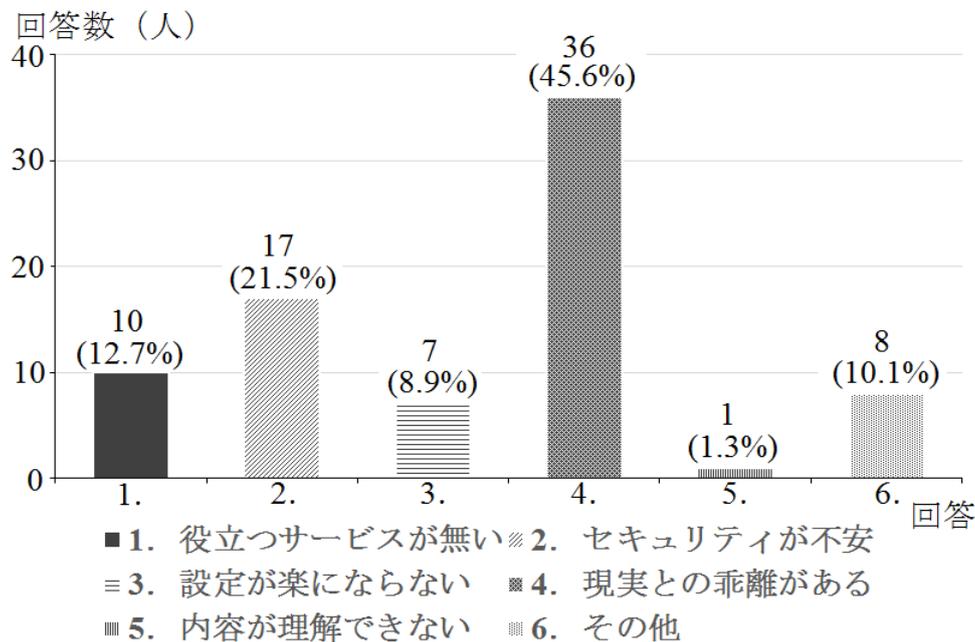


図 17: (質問 3) への回答結果

Fig.17: Result of Answer for Q. 3.

さらに、(要件 5) については、本節において、アンケート調査を通じて、満足することを示した。

また、受容性をさらに向上するためには、セキュリティについて十分に補償される方式とする必要性が明らかとなった。セキュリティについて、本提案が通信キャリアに採用される場面を想定し、その対策の具体例を整理する。主なセキュリティのリスクとして、次の 4 点が考えられる。(リスク 1) M2M-GW と M2M-SV 間の通信が通信経路の盗聴により漏洩する(盗聴)リスク。(リスク 2) M2M-SV に不法侵入される(不法侵入)リスク。(リスク 3) なりすましにより、意図しない M2M-GW に M2M デバイスと通信するための暗号鍵が渡る(なりすまし)リスク。(リスク 4) 誤ったグループに M2M-GW が設定される(誤設定)リスク。

(リスク 1) については、L2TP/IPsec 等、既存のスマートフォンが標準的に備える VPN 機能の活用によりリスクが低減され则认为している。また(リスク 2) については、本提案が通信キャリアに採用される場合、M2M-SV を通信キャリアの閉域網内に設置することが可能となり、M2M-SV に接続可能な端末を送信元により制限可能なため、リスクを低減できると考えている。さらに、M2M-SV を通信キャリアの閉

域網内に設置することは（リスク1）のリスク低減にも寄与する。（リスク3）については、SIMを活用した端末認証により、なりすましのリスクを低減できると考えている。（リスク4）については、通信キャリアによる複数の M2M-GW に対する割引サービスが利用されている場面において、契約情報と M2M-GW が備える SIM や FTTH の回線番号を用いることで、誤設定によるリスクが低減できると考えている。

2.7 まとめ

本章では、近年、スマート社会を実現するネットワークサービスとして注目される M2M や IoT について、そのデバイス数が増大した場合、特にセキュリティ設定や認証が必要な Bluetooth デバイスを対象とした際、必要な接続設定の回数も増大する点を課題と捉えた。この課題に対し、デバイスが接続されるゲートウェイが動的に変更される場面を想定し、通常、通信設定を直接実施した機器のみが内部に有する通信設定を、機器間で共有するグループを新たに定義した上で、このグループ内でシームレスな設定の切替えを行うことで、2台目以降のゲートウェイにおける通信設定の煩雑さを解消する新たな設定管理技術を提案した。また、実装を通じて、提案による設定時間を示すとともに、一般向けの展示会において、コンセプトデモの展示を実施し、展示の参加者へのアンケート調査を通じて、本提案の受容性を示した。これにより提案が、著者らがあらかじめ設定した5つの要件を同時に満足することを示した。提案技術は、M2M や IoT における接続設定の煩雑さを解消し、スマート社会の実現を促進することができる。

第3章 シグナリングスパイクを抑制する 接続タイミング制御技術

本章では、1章1.2節の『課題2：瞬間的な輻輳が設備障害を誘発する』を解決する接続タイミング制御技術を提案する。

3.1 はじめに

近年の、スマートフォンやM2Mデバイスの急速な伸長により、それらが接続される移動体通信網（LTE, Long-Term Evolution）におけるトラフィックパターンも変化しつつあり、その変化が原因となって、MNOが構築・運用する通信設備の安定性の阻害要因となる現象が顕在化しつつある。従来、移動体通信における典型的なトラフィックパターンでは、Web閲覧やFTP（File Transfer Protocol）によるファイル送受信に代表されるように、通信中（アクティブ）と通信が発生しない（インアクティブ）の時間帯を明確に分離することができた。また、それらアクティブとインアクティブの切替は端末の利用者の操作によって決まり、例えばWeb閲覧においては、URLの入力やWebページ内のリンク押下時にのみトラフィックが発生し、それ以外の時間帯においては基本的にトラフィックが発生しない状態となっていた。一方、スマートフォンやM2Mデバイスによるトラフィックは、利用者の操作によらず発生する場面が多くある。具体的には、スマートフォンにインストールされたSNS（Social Networking Services）やIM（Instant Messaging）アプリケーションがリアルタイムの着信通知や利用状況の共有のため、利用者の操作とは別にバックグラウンドでパケットの送受信を行うことによりトラフィックが発生する。こうした通信は、アプリケーション毎、サービス毎に提供者側で決められた時間間隔で動作する[24]。また、M2Mデバイスにおいても同様に、例えば周辺環境の情報を収集しサーバに定期送信するM2Mデバイスであれば、あらかじめ決められた時間間隔でパケットの送受信を行うこととなる。こうしたパケットの送受信毎に、スマートフォンやM2Mデバイス（今後、本章にお

いては、スマートフォンやM2Mデバイスを区別せずに、単にUE (User Equipment) と呼ぶ) と移動体通信網の間で、無線リソースをUEに割り当てるための接続(接続要求処理)と切断の制御信号のやり取りが行われる。

こうした、UEの接続要求処理は多数のUE間で同期する場合がある。例えば、あるアプリケーションが決まった時刻にバックグラウンドで通信する(例えば毎正時にアップデートを確認する)実装であった場合、集約設備には多数のUEから同時刻に接続要求が到着することとなり、瞬間的に集約設備の負荷が増大することとなる。また、アプリケーションの提供者が、そうした集約設備の負荷を勘案し、同時刻に通信を開始しない実装としていたとしても、利用者の設定により、接続要求処理が同期する場合がある。具体的には、目覚ましと同時に天気や交通情報をネットワークから取得し、表示するアプリケーションがあったとすると、(例えば6時等)人間の行動特性として同時刻に設定する利用者が多いと、多数のUE間で接続要求処理が同期することとなる。さらに、緊急地震速報(ETWS, Earthquake and Tsunami Warning Systems)等によって多数のUEが同時刻に通信を開始する場面も存在する。こうした、多数のUEが同時刻に接続要求することで、集約設備で接続要求を処理するための制御信号(シグナリング)が瞬間的に大量発生する現象を、本章ではシグナリングスパイク(または単にスパイク)と呼ぶ。シグナリングスパイクは、接続要求処理を行うMNOの集約設備において瞬間的な過負荷となり、大規模なサービス影響を引き起こすリスクがある[24, 25]。そのため、シグナリングスパイクへの対応はMNOにとって重要な課題となる。

従来、制御信号の低減を目的とする研究開発が実施されている[64, 65, 66, 67]。従来研究[64]においては、着信通知等の実現のためにアプリケーション毎に実装されていたネットワーク側から端末向けのプッシュ通信機能を、複数のアプリケーションで集約することにより、プッシュ通信機能に関わる制御信号を時間的、機能的にまとめることで、個々のアプリケーションが個別にプッシュ通信を実現することと比較して制御信号の発生機会を抑制している。しかしながら、アラームやETWS等、端末間の同期によって発生するスパイクを抑制することは難しい。

また、スパイクの発生を抑制するため、アプリケーション開発者向けのガイドラインが発行されている[65, 66]。こうしたガイドラインの中では、アプリケーションか

らの送受信タイミングが重複しないように実装することが求められている。しかしながら、全てのアプリケーションがガイドラインに従って実装されているとは限らず、ガイドライン発行以降もスパイクが完全に抑制されているわけではない。

そうした背景から、スマートフォンや M2M デバイスが具備する通信用のチップセットそのものが送受信タイミングを制御するハードウェアベースの従来研究が提案され、一部の商用スマートフォンには実装されている (NSRM, Network Socket Request Manager) [67]。NSRM においては、利用者操作によるパケット送受信 (フォアグラウンド通信) か、バックグラウンドで実行されているアプリケーションによるパケット送受信 (バックグラウンド通信) かを、ディスプレイの OFF/ON で判断し (ディスプレイが OFF の場合、利用者操作によらないバックグラウンド通信と判断する)、バックグラウンド通信に限って送信を一定期間保持する機能を提供する (フォアグラウンド通信については利用者が体感する品質に直接的に影響することが懸念されるため、NSRM では制御の対象外としている)。しかしながら、ETWS を受信した端末の動作を考えた場合、端末からのパケット送受信が行われる段階で ETWS によりディスプレイが ON 状態となっているため、NSRM において ETWS 起因の通信はフォアグラウンド通信として扱われる (制御の対象外となる)。そのため、NSRM では ETWS 起因のスパイク発生を抑制できない。

こうした UE 間の同期によるスパイクの発生を抑制するため、本章においては端末による接続タイミング制御技術 (UENAC, User Equipment based Network Access Control Scheme) を新たに提案する。提案技術 (UENAC) では、自律分散的な手順によってスパイクの発生を抑制することを目的としている。具体的には、UE が通信を行う前に UE 内において数秒程度の通信遅延を付与することで、多数の UE が同時にネットワーク接続しスパイクが発生することを防ぐ。提案技術 (UENAC) は NSRM とは異なり、ETWS のように、多数の端末が同時にディスプレイが ON となるような場面においてもスパイクの発生を抑止する。特に、日本においては、一年を通じて多数の ETWS が発報されるため、こうした制御技術は通信基盤の安定運用実現のため重要となる。

3.2 シグナリングスパイクの発生メカニズム

提案の前に、本章で扱うスパイクの発生メカニズムについて詳述する。LTEの通信システムにおいては、スマートフォンやM2Mデバイス等、全てのUEが無線リソースの制御（RRC, Radio Resource Control）に関わっている。RRCは標準化団体3GPPによるLTEの標準仕様[68]に規定されており、有限な無線リソースと端末側の電力消費を抑えるために、通信を行う時間帯のみ無線リソースを消費するよう制御している。具体的には、起動されたUEはLTEネットワークに登録され、登録後、RRCは「RRC Connected」または「RRC Idle」のいずれかの状態となる[24, 68, 69]。UEがパケットの送受信を実施している間のみ、RRCは「RRC Connected」状態（無線リソースが基地局によってUEに割り当てられ、UEはいつでもパケットの送受信ができる状態）に保たれ、最後のパケット送受信から一定期間（Idle timer）通信が無いと、基地局側からの制御によりRRCが「RRC Connected」から「RRC Idle」へと切り替わる。通信の無いUEのRRCを「RRC Idle」とすることで、それまで当該UEで使用していた無線リソースが解放され、またアンテナからの無線信号出力がなくなることで、このUEの電力消費も抑制することができる仕組みとなっている。

本章では、「RRC Idle」から「RRC Connected」となる際に発生する制御信号のスパイクに注目している。図18にETWSによってスパイクが発生する様子を示す。ETWSが発報された場合、到達が予想される地震や津波の情報を利用者に通知するために、ETWSの対象エリアに存在するUEのディスプレイがONとなる（図18[S1]）。M2Mデバイス等、ディスプレイのないUEについても、デバイスの種類によってはこのタイミングで機能が有効化されることとなる。例えば、通信機能を具備するセンサを想定した場合、地震や津波といった環境変化によって、通信が誘発される。また、バスや車、バイクによっては安全確保のための緊急通信が誘発される。また一部の調査結果によると[66]、ディスプレイがONとなった際には特定のアプリケーションで通信が誘発されることが報告されており（アプリケーションサーバと通信し、最新の状態を確認する等の処理が実施される）、ETWSを契機に通信が発生することとなる（図18[S2]）。ディスプレイがONとなった際のこうしたアプリケーションの振る舞いによって、多くのUEではRRCが「RRC Idle」から「RRC Connected」に変わる（図18[S3]）。この際、複数の制御信号がUEとLTEネットワーク上の集約装置

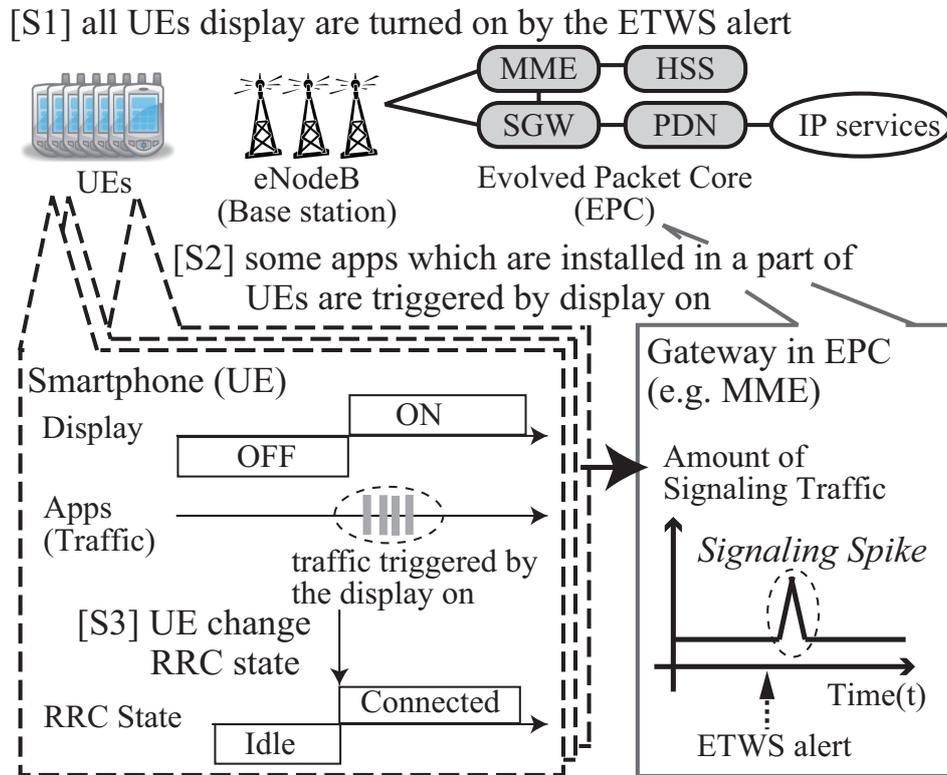


図 18: 端末間の同期によって発生するシグナリングスパイク
 Fig.18: Signaling spike caused by synchronization.

間（例えば、MME（Mobility Management Entity）等）で発生することとなる。こうしたRRCを「RRC Idle」から「RRC Connected」に変更する動作が、多数のUE間で同時刻に実施された場合には、大量の制御信号がUEと集約装置間で発生し、スパイクとなる。

3.3 関連研究

スパイク発生の抑制を目的とした従来研究がある [64, 65, 66, 67]。従来研究 [64] においては、着信通知等の実現のためのネットワーク側から端末向けプッシュ通信機能を複数のアプリケーションで集約することにより、個々のアプリケーションが個別にプッシュ通信を実現せずに、時間的、機能的にまとめて行うことで制御信号の発生機会を抑制している。これにより、例えばメールやメッセージの着信通知等、サーバからのリアルタイムなプッシュ通信が利用者の利便性に直接的にかかわるアプリケー

ションにおいて頻繁に実施されるパケット送受信が集約され、その結果、パケット送受信ごとに発生していたRRC状態遷移による制御信号が抑制される効果が得られる。一部のメッセージングアプリ群がインストールされた端末で、従来研究[64]を適用した場合にはRRC状態遷移数を75.7%削減できたとの調査結果が報告されている[64]。しかしながら、多数のスマートフォンが同時刻にパケット送信を実施した場合には、スパイクが発生する。

スマートフォンのアプリケーション開発者向けの開発ガイドラインが提供されている[65, 66]。開発ガイドラインにおいては、アプリケーションサーバが停止した際に大量に発生するパケット再送について、スパイクが発生しないよう再送間隔を調整することが推奨されている[65]。さらに、ディスプレイのOFF/ONは利用者による端末操作無く起こりうるため、ディスプレイOFF/ONにより通信を開始しないことを推奨している[66]。しかしながら、開発ガイドラインの順守は、アプリケーション開発者に委ねられており、全てのアプリケーションを開発ガイドラインを遵守した実装とすることは難しい。

また、そうした背景から、スマートフォンやM2Mデバイスが具備する通信用のチップセットそのものが送受信タイミングを制御するハードウェアベースの従来研究が提案され、一部の商用スマートフォンには実装されている(NSRM)[67]。NSRMにおいては、利用者操作によるパケット送受信(フォアグラウンド通信)か、バックグラウンドで実行されているアプリケーションによるパケット送受信(バックグラウンド通信)かを、ディスプレイのOFF/ONで判断し(ディスプレイがOFFの場合、利用者操作によらないバックグラウンド通信と判断する)、バックグラウンド通信に限って送信を一定期間保持する機能を提供する(フォアグラウンド通信については利用者が体感する品質に直接的に影響することが懸念されるため、NSRMで制御の対象外としている)。LTEスマートフォンにNSRMを採用した場合、採用しない場合と比較し52%の制御信号の抑制効果が得られるとしている[67]。しかしながら、ETWSを受信した端末の動作を考えた場合、端末からのパケット送受信が行われる段階でETWSによりディスプレイがON状態となっているため、NSRMにおいてETWS起因の通信はフォアグラウンド通信として扱われる(制御の対象外となる)。そのため、NSRMではETWS起因のスパイク発生を抑制できない。

3.4 端末による接続タイミング制御技術

こうしたスパイクはMME等の集約装置の過負荷を引き起こし、装置の安定稼働を毀損する。一方、1章にも記載の通り、M2Mは社会インフラとなることが期待されており、装置やサービスの安定稼働を実現することは重大な課題となる。そこで、こうしたスパイクを抑制するために、端末による接続タイミング制御技術（UENAC）を新たに提案する。UENACは多数のUEから同時に発生する接続要求を自律的に分散することで、スパイクの発生を抑制することを目的としている。以降に、UENACについて詳述する。

3.4.1 UENACの概要

多数のUEからの接続要求分散化のため、UENACは各UE上で実行されるソフトウェアまたはUEのOSの一部として機能することを想定している。UENACは各UEにおいて、アプリケーションから発生するパケット送受信のタイミングを必要に応じて制御することで、パケット送受信によって発生する「RRC Idle」から「RRC Connected」へのRRC状態遷移タイミングをUE間で分散し、スパイクの発生を抑制する。UENACはUEのソフトウェアアップデートで有効化できるため、基地局（Base Stations, eNodeB）や集約装置の変更が必要な負荷分散技術UPCON（3GPP User Plane Congestion Management）[70]より、適用までの期間やコストの点で優位性があると考えている。本章で提案するUENACの概要を、UEがETWSを受信しからの動作を例に図19に示す。

ETWSが発報された場合（図19 [T1]）、各UEにおいてUENACが有効化される（図19 [T2]）。UENACが有効化された後、ETWSによる地震や津波の情報を表示し端末利用者に通知するために、UEのディスプレイがONとなる（図19 [T3]）。UENACの有効化によって、UENACは内部で「No-Wait」と「Wait」という2つの状態を持つ制御ウィンドウを起動する。2つの制御ウィンドウは一定間隔で「No-Wait」と「Wait」状態を繰り返す。制御ウィンドウが「No-Wait」状態である場合にはUENACは、他アプリケーションによるパケットの送受信を許可する。一方、制御ウィンドウが「Wait」状態である場合には、UENACは他アプリケーションによるパケットに送信遅延を付与し、制御ウィンドウが「No-Wait」状態となるまでの間、UEからパケット送受信が

発生しないように制御する（これにより制御ウィンドウが「No-Wait」状態となるまでの期間、RRCは「RRC Idle」の状態を維持することとなりUEと集約装置間の中で制御信号が発生することはない）。ETWSを受信しディスプレイがONとなった場合に、一部のアプリケーションはパケットの送受信を開始するが（図19 [T4]）、UENACが送信遅延を用いることで制御ウィンドウが「No-Wait」の状態の場合にのみパケット送受信が可能となるため（図19 [T5]）、RRCが「RRC Idle」から「RRC Connected」となるタイミングが変化する（図19 [T6]）。UENACでは、最初に「Wait」制御ウィンドウとなり、この「Wait」状態の長さをランダムに決定することで、自律分散的にスパイクを抑制する。

3.4.2 UENACの有効化タイミング

スパイクを抑制するために、以降に記載のタイミングでUENACの有効化が必要だと考えており、また1度の有効化によるUENAC機能の持続時間は設定可能な数分程度を想定している。

外部イベントによる機能の有効化

ETWSのような外部イベントにより機能を有効化するため、UENACはこうした外部イベントを検知する機能を有することを考えている。具体的には、UENACはLTEページング信号を受信し（ETWSはLTEページングの一部として規定されている）、ETWS等、特定の信号が基地局から広報された場合にUENACを有効化する。

UENACの定期的な有効化

実装上、通信タイミングを分散するロジックの考慮漏れや起床時のアラーム設定等、定期的にスパイクが発生する場面が想定される。こうした場面を考慮しUENACは定期的にその機能が有効化することを想定する必要がある。例えば、通信タイミングの分散ロジックの考慮漏れ等の場合には、ファームウェアアップデート等で修正されるのが一般的であるが、ファームウェアアップデート完了までの期間、UENACによって通信タイミングを分散することで、スパイクの影響を一時的に抑制する運用が可能である。こうした、UENACのスケジューリングは、MNOによって設定されることを想定している。MNOは自身が構築・運用する集約設備等の適正な運用のために、

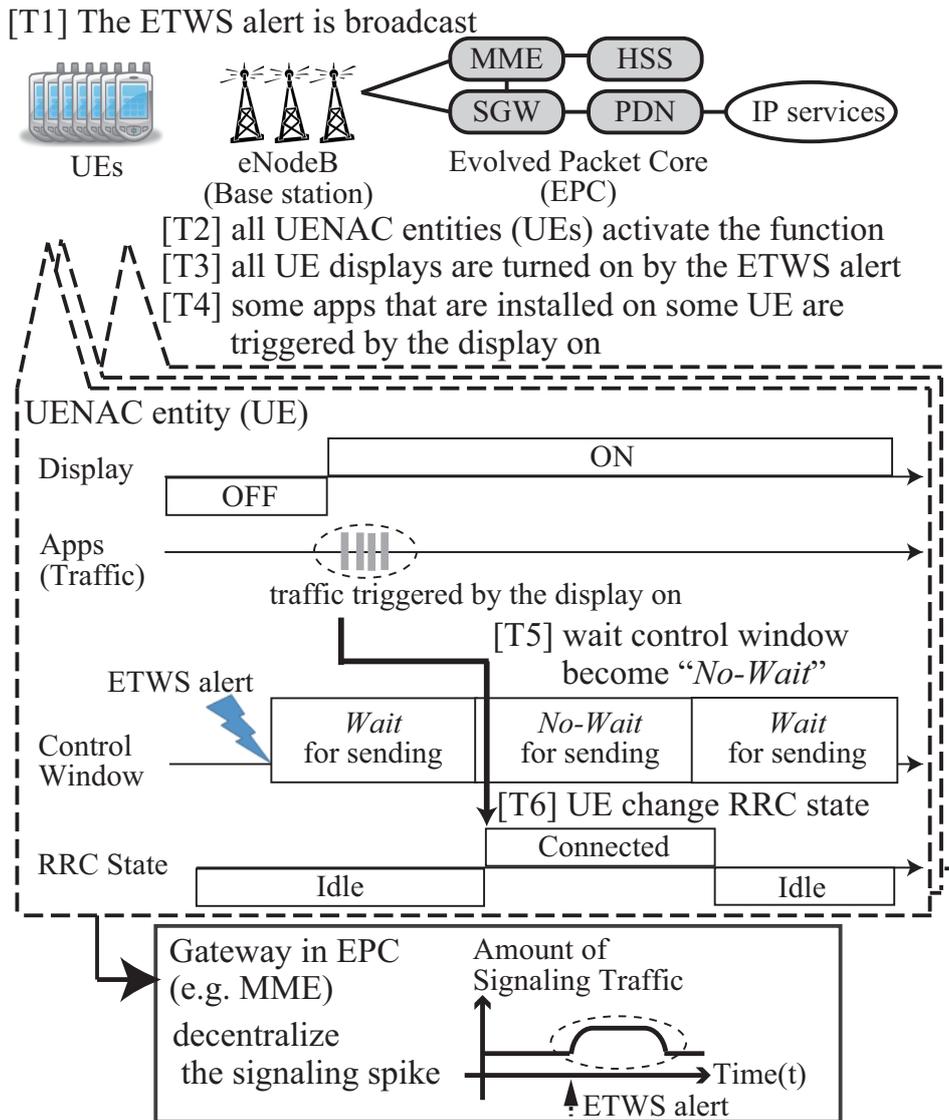


図 19: 端末による接続タイミング制御技術

Fig.19: Behavior of UE-based network access control scheme.

日々監視を実施しており、その中で定期的に発生するスパイクを検知した場合には、UENACを用いることでスパイクの影響を除外し、安定運用を実現することとなる。

3.4.3 制御ウィンドウ長の適切化

UENACでは、通信遅延を送信パケットに付与することで、RRCが「RRC Idle」から「RRC Connected」状態となるタイミングを多数のUE間で分散制御し、RRCの状態遷移に伴い発生する制御信号の発生タイミングの重複を回避することでスパイクを抑制する。こうした通信遅延の付与を、ディスプレイがONの状態においても実施するという点が、既存技術（NSRM）[67]と異なる。一方、ディスプレイがON状態の際に通信遅延を用いることは、そのまま利用者が体感する品質を低下させてしまうリスクを伴う可能性がある。そのため、付与する通信遅延は可能な限り短く設定し、かつスパイクの抑制には十分な長さとする必要がある。具体的には、送信遅延を長く設定した場合、スパイクの抑制効果は高くなるのだが、UE上のアプリケーションが通信エラーや異常メッセージをディスプレイ上に表示するようなことがあっては、利用者が体感する品質を著しく毀損する事態となり得る。特に、ETWS発報直後の通信については、利用者にとっても緊急度の高いものが含まれる可能性があるため、留意が必要である（なお、到達が予想される地震や津波の大きさについてはETWSそのものに含まれるため、こうした重要な通知にUENACが影響を与えることはない）。

一般に、モバイルアプリケーションは通信を行う際、通信において輻輳やエラーが発生している場面を想定し、通信にタイムアウト時間を設定している。UENACによる通信遅延の付与により、少なくとも通信エラーや異常メッセージの表示を回避するには、アプリケーションの開発者が設定する通信のタイムアウト時間よりも制御ウィンドウによって付与する遅延を短く設定する必要がある。

通信のタイムアウト時間の設定方法は、モバイルアプリケーションが実行される環境によって異なる。例えばAndroid OSにおけるTCP通信に注目した場合、アプリケーション開発者は`java.net.URLConnection`クラスを使用することがある。このクラスを使用する場合`setConnectTimeout(int timeoutMillis)`メソッドを用いてタイムアウト時間を設定することができるが、デフォルトのタイムアウト時間は設定されておらず、タイムアウトまで数分程度かかる[71]。他の主要なクラス（`java.net.Socket`）

においても同様にタイムアウトまで数分程度に設定されている [71]. また, Android OS における UDP 通信に注目した場合, UDP を用いた主要な通信である DNS 検索処理のタイムアウト時間は 10 秒となっている (Android OS は 5 秒にタイムアウトが設定された DNS 検索クエリを 2 回送付し, 2 回ともに応答がなかった場合にはタイムアウトとしている) [72]. DNS 検索処理の LTE ネットワークにおける最頻値が 1.2 秒であることを考えた場合 [73], UENAC は数秒であれば異常メッセージのポップアップ等の直接的な品質の既存要因の発生無く遅延を付与できると考えられる. 具体的に不要可能な送信遅延については, 次節以降にて実装を通じ確認する.

3.5 提案の実装

UENAC が既存のアプリケーションが送信するパケットに通信遅延を付与することの影響を確認することを目的に, 提案手法を市販の Android 端末 (Google Nexus 5, Android 4.4.2) 上で実装する.

3.5.1 実装した UENAC の詳細

UENAC を実装するため, 次の 2 つのオープンソースプロジェクトの成果を活用する.

Iptables プロジェクト [74]

Iptable はユーザ領域からコマンドラインにて制御可能な IP パケットのフィルタリング機能を提供する. IP パケットのフィルタリング機能は, 送信と受信それぞれに個別のフィルタルールを適用でき, 送信パケット用のフィルタルール *OUTPUT chain* と受信パケット用のフィルタルール *INPUT chain* に *Iptables* の記述形式に準拠したコマンド群を記載することで制御する.

libnetfilter_queue(NFQUEUE) プロジェクト [75]

NFQUEUE は送受信パケットのキューイングをカスタマイズするためのライブラリを提供する.

図 20 とともに実装した UENAC 端末のパケットフローについて述べる. 実装した UENAC 端末では, アプリケーションが任意のタイミングで送信する全てのパケットは,

フォアグラウンドとバックグラウンドの区別なく、端末から送信される前に *OUTPUT chain* に送信される (図 20 [U1])。実装した UENAC 端末において UENAC 機能 (送信パケットに対して送信遅延を付与することでスパイクを抑制する機能) の有効化は *OUTPUT chain* のフィルタルールを変更し、全ての送信パケットを *NFQUEUE* によって実装したキュー (カスタムキュー) に転送することで実現する (図 20 [U2])。カスタムキューで送信遅延を付与することで、アプリケーションからの送信パケットが端末から実際に送信されるタイミングを制御する (図 20 [U3])。カスタムキューにおいて付与される送信遅延によって、図 19 に記載の制御ウィンドウの「Wait」と「No-Wait」の状態を実現しており、ここでカスタムキューがアプリケーションの送信パケットに付与する送信遅延は固定長ではなく、現在の制御ウィンドウの状態と時刻によって変わる。具体的には、現在の制御ウィンドウが「Wait」状態の場合、次に「No-Wait」状態となるまでの時間を送信遅延とする。現在の制御ウィンドウが「No-Wait」状態の場合、送信遅延を付与しない (送信遅延を 0 秒とする) 実装としている。一方、受信パケットについては、遅延を付与することなくそのまま宛先のアプリケーションに転送される (図 20 [U4])。また、UENAC 端末において UENAC 機能が無効化されている (通常の端末動作と同様、送信遅延を付与することなくアプリケーションはパケットの送受信を行う) 場合には、*OUTPUT chain* に記載の転送ルールをすべて無効化することで、アプリケーションからの送信パケットは端末からそのまま送信されることとなる (図 20 [U5])。

3.5.2 実装した UENAC 端末による既存アプリへの影響調査

UENAC が付与する送信遅延が既存のアプリケーションに与える影響を実装した UENAC 端末により評価する。影響調査のため、前節にて実装した UENAC 端末に、*Google Play*[76] でダウンロード数が多い 12 のアプリケーションをインストールした。インストールした 12 のアプリケーションの中には、*Twitter* や *Facebook* といった SNS アプリケーション、*Facebook Messenger* や *LINE* といった IM アプリケーションが含まれる。

UENAC 端末において、異なる送信遅延長 (異なる制御ウィンドウ長) をアプリケーションからの送信パケットに付与した場合の振る舞いを調査する。以降、制御ウィン

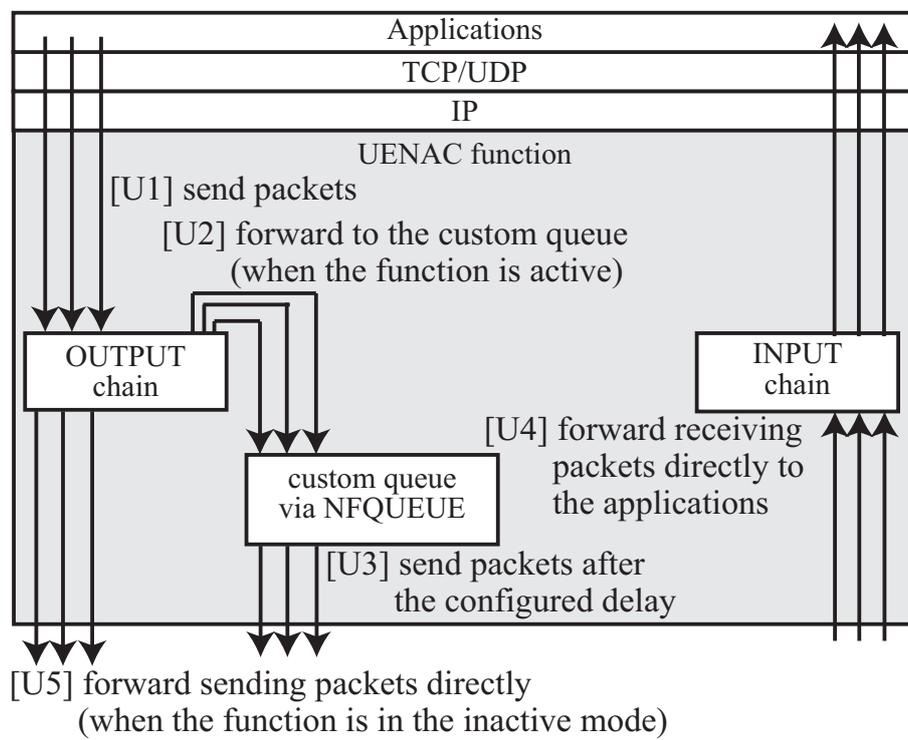


図 20: 実装した UENAC のパケットフロー
 Fig.20: Packet flow in the implemented UENAC entity.

ドウが「No-Wait」状態の長さを $T_{no-wait}$, 「Wait」状態の長さを T_{wait} と記載する。影響調査のため、 $T_{no-wait}$ の長さを 1 秒に固定し、 T_{wait} を 0 から 60 秒の間で変更した際の既存アプリケーションへの影響を各条件 (T_{wait} の設定毎) において 12 時間継続調査した¹。

図 21 は、UENAC 端末上において、送信遅延が DNS 検索処理に与える影響を調査した結果を示している。事前調査の結果、Android 端末において DNS 検索処理がタイムアウト (DNS タイムアウトが発生) した場合、*ICMP Destination Unreachable (Port Unreachable)* が DNS サーバに送信されることを確認しており、UENAC が影響を与えないためには、DNS タイムアウトの発生が無い範囲で遅延を付与する必要があると考えている。図 21 は T_{wait} の設定長毎の DNS タイムアウトの発生確率 (左軸、実線) と全 DNS 検索クエリ中に占めるプライマリ DNS 宛のクエリの割合を示している。 T_{wait} に 8 秒以上設定した場合には、DNS タイムアウトが検知された (T_{wait} が 8 秒未満の場合には 0 となっていた実線 (DNS タイムアウト) が $T_{wait} = 8$ 秒から上昇している)。また、プライマリ DNS 宛の DNS クエリの割合は、 T_{wait} に 6 秒以上設定した場合から減少していた。

またさらに、一般的なパケットの送受信に多く利用される TCP への影響を調査するため、送受信パケットにおける TCP 再送率を調査した。調査結果を図 22 に示す。図 22 は T_{wait} の設定長毎の TCP 再送率を示している。TCP の再送は、 T_{wait} によらず発生しているが、再送率は T_{wait} の長さに比例して上昇する傾向であることがわかる。実環境においては、 T_{wait} の長さはジッターの大きさとなって表れるため、可能な限り小さく設定することが望まれる。

実装した UENAC 端末を用いた以上の調査結果から、 T_{wait} に 8 秒未満の値を設定することで、タイムアウト等の発生なく UENAC を機能させることができる。

¹実環境において、スパイクを抑制するために 12 時間も UENAC が送信遅延を付与しつづける状況は想定していないが、調査期間の 12 時間の中に既存のアプリケーションが生成した送信パケット (端末を操作することなく生成されたバックグラウンド通信) に遅延を付与した。アプリケーションによっては複数回送信エラーとなった場合にメッセージ表示する等の実装が想定されるため、長時間連続して遅延を付与する本調査は実環境より厳しい条件となっていると想定している。

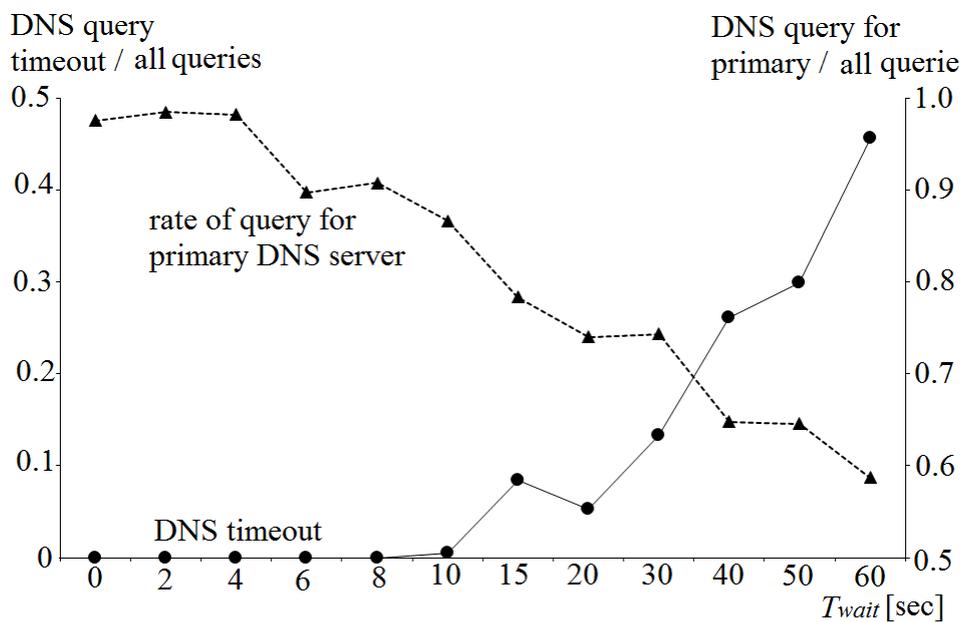


図 21: DNS 検索処理への影響
 Fig.21: Details on DNS lookup.

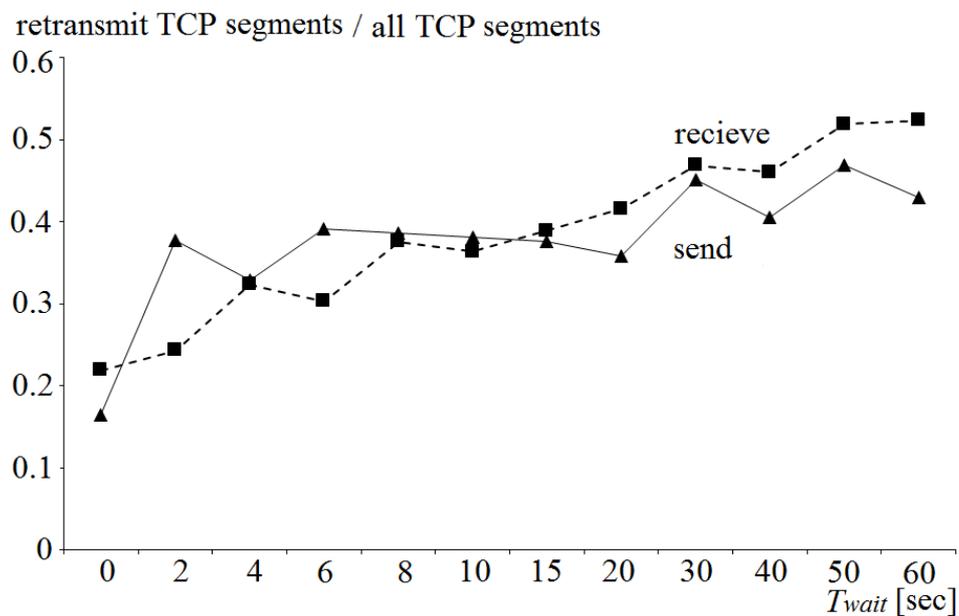


図 22: TCP 再送処理への影響
 Fig.22: Details on TCP retransmission.

3.6 UENAC によるスパイク抑制効果

実装した UENAC 端末を用いた既存のアプリケーションへの影響調査を通じて、8 秒未満の送信遅延であればタイムアウト等を発生させることなく付与できることを示した。8 秒未満の送信遅延によって、実環境で想定されうるスパイクを抑制できるかを確認するため、本節では、モデル化を通じたシミュレーション評価を実施する。

表 4: スパイクのモデル化に用いる変数定義
Table4: Notations for modeling of the Spike.

N_{UE}	EPC における集約装置 (MME 等) に登録済みの UE 数
N_{trans}	ETWS 発報によって RRC が「RRC Idle」から「RRC Connected」となる UE 数
N_{back}	ETWS 発報時点においてバックグラウンド状態 (ディスプレイ OFF 状態) である UE 数
N_{sync}	ETWS 発報によってパケット通信を開始する UE 数
$N_{accidental}$	ETWS 発報とは無関係に RRC が「RRC Idle」から「RRC Connected」状態となる UE 数 (偶然その時間帯に「RRC Connected」状態となる UE 数)
R_{trans}	ETWS 発報によって RRC が「RRC Idle」から「RRC Connected」となる UE の割合
$R_{default}$	ETWS 発報とは無関係に RRC が「RRC Idle」から「RRC Connected」状態となる UE の割合 (偶然その時間帯に「RRC Connected」状態となる UE の割合)
R_{UENAC}	UENAC が実装済みの UE の割合
$R_{connected}$	ETWS 発報時、既に「RRC Connected」状態の UE の割合
$R_{triggered}$	ディスプレイ ON によってパケット送受信を開始するアプリケーションがインストールされた UE の割合
R_{send}	バックグラウンド通信を開始する割合

3.6.1 スパイクのモデル化

UENAC が実環境で想定されうるスパイクを抑制できるかを確認するため、スパイクをモデル化する。スパイクをモデル化するにあたり、ETWS が早朝に発報した場面を想定する。これは、早朝時間帯には一般的に多数の UE がバックグラウンド状態（利用が無くディスプレイが OFF の状態、または M2M デバイスにおいては人やモノの動きが少なく通信が発生しづらい時間帯）であり、ETWS 発報によって多くの端末が同期しやすいため、影響の大きいスパイクが発生しやすいためである。表 4 にモデル化に用いる変数の定義を示す。

UENAC の効果は R_{trans} （ETWS 発報によって RRC が「RRC Idle」から「RRC Connected」となる UE の割合）がどれだけ抑制されるかによって確認することができる。 R_{trans} が $R_{default}$ （ETWS 発報とは無関係に RRC が「RRC Idle」から「RRC Connected」となる UE の割合）と比較して著しく大きい場合、ETWS 発報によってスパイクが発生していることを示す。以降に R_{trans} を求める。

R_{trans} を求めるため、まず、ETWS 発報時点においてバックグラウンド状態の UE 数を求める。これは、ETWS 発報時点において既に通信中（「RRC Connected」状態）の UE については、ETWS によって RRC の状態変更（「RRC Idle」から「RRC Connected」状態となる）が無い場合制御信号が追加で発生することはない、スパイク発生の観点から無視できるためである。接続中の UE の割合 $R_{connected}$ から、ETWS 発報時点にバックグラウンド状態である UE 数 N_{back} は式 1 により求めることができる。

$$N_{back} = N_{UE} - N_{UE}R_{connected} \quad (1)$$

また、バックグラウンド状態の UE の中で、ETWS 発報によって同期して通信を開始する UE 数 N_{sync} は、バックグラウンド状態の UE 数 N_{back} と $R_{triggered}$ から、式 2 により求めることができる。

$$N_{sync} = N_{back}R_{triggered} \quad (2)$$

さらに、ETWS の発報とは無関係に、偶然 ETWS 発報と同じタイミングで RRC の状態変更（「RRC Idle」から「RRC Connected」状態とする状態変更）によって制御

信号の発生がある UE 数 $N_{accidental}$ は、バックグラウンド通信の発生確率 R_{send} によって、式3により求めることができる。

$$N_{accidental} = (N_{back} - N_{sync})R_{send} \quad (3)$$

秒間 RRC 状態遷移数 N_{trans} (1 秒間に「RRC Idle」から「RRC Connected」状態とする状態変更が行われる UE 数) は、式4により定義することができる。

$$\begin{aligned} N_{trans} = & (N_{sync}(1 - R_{UENAC})) + N_{sync}R_{UENAC}/T_{wait} \\ & + (N_{accidental}(1 - R_{UENAC}) + N_{accidental}R_{UENAC}/T_{wait}) \\ & + \sum_{i=t-T_{wait}}^{t-1} (N_{back(i)}R_{send})R_{UENAC}/T_{wait} \end{aligned} \quad (4)$$

式4において R_{UENAC} は、全 UE における UENAC 端末の割合を示している。また、式4第1項は ETWS 発報によりアプリケーションが発生させる RRC 状態変更（「RRC Idle」から「RRC Connected」状態への変更）数を示しており、第2項は ETWS 発報とは無関係に発生する RRC 状態変更数、第3項は UENAC によって送信遅延が付与されることで発生が（実際のアプリケーションによるパケット送信から）遅れて発生した RRC 状態変更数を示している。

以上により、(ETWS 発報の無い) 通常時の RRC 状態遷移 (1 秒間に「RRC Idle」から「RRC Connected」状態に遷移する UE の全 UE に占める) 割合 $R_{default}$ と UENAC 端末を含む環境下における ETWS 発報時の RRC 状態遷移割合 R_{trans} はそれぞれ式5と式6で求めることができる。

$$R_{default} = N_{back}R_{send}/N_{UE} \quad (5)$$

$$R_{trans} = N_{trans}/N_{UE} \quad (6)$$

3.6.2 UENAC によるスパイク抑制効果シミュレーション

UENAC によるスパイクの抑制効果を評価するため、UENAC 端末の割合 R_{UENAC} が異なる環境下での $R_{default}$ と R_{trans} をシミュレーションにより求める。シミュレーショ

ンに際し、接続中の端末の割合 $R_{connected}$ を 0.25 とした。これは、UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) における主要サービスプロバイダの調査結果に基づく [77]。また、バックグラウンド通信が発生する割合 R_{send} は従来研究による実環境の評価結果に基づき 0.0851 とした [78]。

ディスプレイ OFF/ON によってパケット送受信を開始するアプリケーションがインストールされた UE の割合 $R_{triggered}$ を 0.25 とした際のシミュレーション結果を図 23 に示す。ETWS 発報とは関係なく通常発生している通信による RRC 状態遷移割合 $R_{default}$ は 0.064 であった。また、ETWS 発報によって RRC の状態が「RRC Idle」から「RRC Connected」に遷移し制御信号が発生する UE の割合 R_{trans} は、UENAC 端末の割合 R_{UENAC} と制御ウィンドウを「Wait」状態とする長さ T_{wait} に比例して減少することがわかる。

3.5.2 節に示した既存アプリケーションへの影響調査の結果から、既存のアプリケーションへの影響が無いよう T_{wait} に 8 秒を設定し、UENAC 端末の割合 R_{UENAC} を 0.6 とした場合の RRC 状態遷移割合 R_{trans} は 0.127 であり、通常発生している RRC 状態遷移割合 $R_{default}$ (0.064) の約 2 倍という結果であった。集約設備のリソースは、通常時の利用よりも余裕をもって構築・運用されることが一般的であり、また図 23 に示すように、UENAC 端末の割合 R_{UENAC} の向上により R_{trans} の減少が可能であることから提案手法は効果的にシグナリングスパイクを抑制できることがわかる。

3.7 まとめ

大量の M2M デバイスが同時刻に接続した場合に、通信設備の安定性を阻害要因となるシグナリングスパイクが発生することを示し、本章では、このシグナリングスパイクの解消を課題とした。課題解決のため、数秒程度の送信遅延をスパイク抑制が必要な時間帯にのみ端末の送信パケットに付与することでスパイクの発生を抑制する UENAC (User Equipment based Network Access Control Scheme) を新たに提案した。UENAC は自律的な手法によって、大量の UE の接続タイミングを分散化することで制御信号の発生が集中することを抑制している。提案した UENAC が付与する送信遅延が既存のアプリケーションに与える影響を評価するために市販の Android 端末に提案手法を実装した。さらに、実装した UENAC 端末に複数の既存アプリケーショ

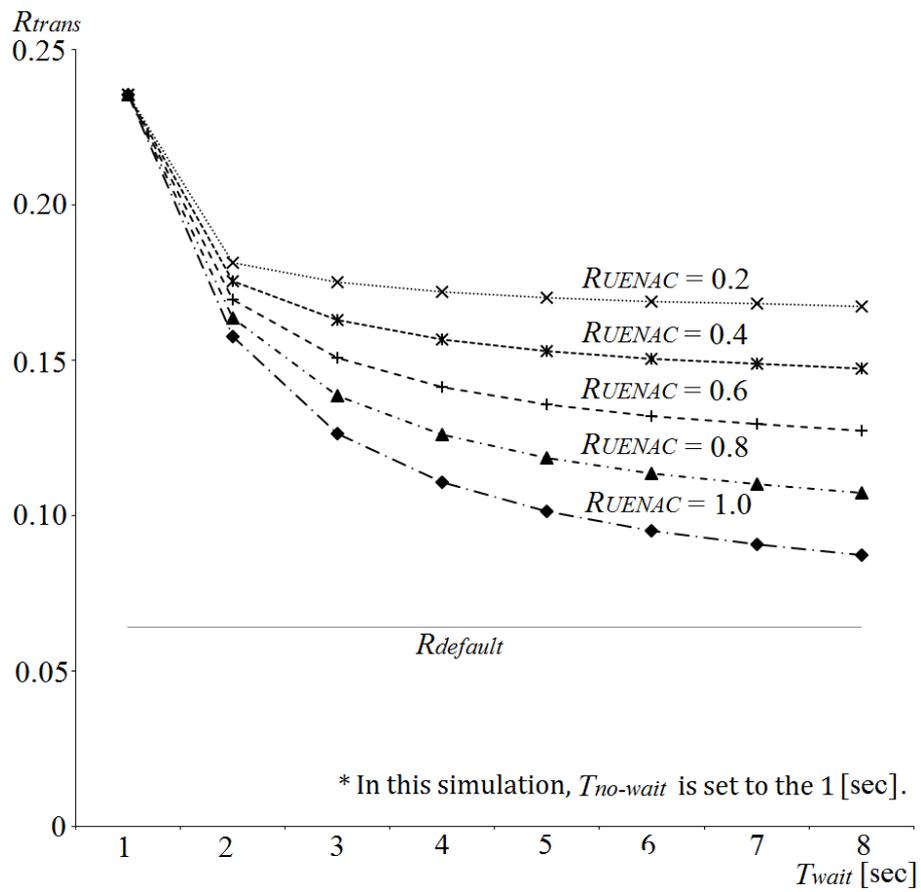


図 23: R_{trans} のシミュレーション結果

Fig.23: Simulation result of R_{trans} .

ンをインストールすることで影響を評価し、8秒未満の送信遅延であれば、既存のアプリケーション動作に影響することなく付与できることを確認した。付与可能な8秒で、スパイクの発生を抑制できるかを評価するために、想定するスパイクのモデル化を行い、シミュレーションによる効果確認を実施した。シミュレーションによる評価の結果、UENACが効果的にシグナリングスパイクを抑制できることを示した。

第4章 通信遅延におけるユーザアウェアネスと QoE の関係に関する検討

本章では、1章1.2節の『課題3：輻輳制御がユーザの体感品質低下を招く』を解決するため、体感品質がユーザの主観に大きく左右されることに鑑み、ユーザの心理的側面から体感品質低下の解消を目指す。

4.1 はじめに

近年の M2M の伸長により、大量の M2M デバイスがネットワークに接続され、今後も急速な増加が見込まれる状況下にある。こうした大量の M2M デバイスが同時刻に一齐にネットワーク接続することでスパイクとなり、スパイクによる一時的な過負荷がネットワークの安定運用の阻害要因となり得る。MNO/MVNO 事業者は一時的な過負荷によってネットワークが不安定とならないよう、通常想定され得る（制御信号を含む）トラフィックや利用者リクエストの流量の最大値に併せて設備投資を行うことが一般的である。しかしながら、3章に記載のように ETWS 発報のような要因や、通常時では想定されないほどに局所的に人が集まるイベント開催のような場面においては、想定以上の負荷が集約設備にかかり、サービスの品質低下を招く [79]。

このような事態に対し、さらに設備投資を行って通信の劣化を防ぐ方法やユーザに補償金を支払い通信の劣化を許容してもらう方法があるが、どちらもさらに直接的に MNO/MVNO 事業者の投資コストとなり、その結果、利用者への通信利用料に転換されることとなるため、社会インフラ化を目指す M2M にとって好ましくない。こうした課題に対処するため、通信端末が発する全ての通信に対し、プロトコルエラーとしない程度の短時間の送信遅延を付与し、制御信号が発生するタイミングを分散する方式 UENAC (User Equipment based Network Access Control Scheme) を3章に提案した [80] (以下、本章においては端末制御方式と呼ぶ)。端末制御方式では、付与可能な送信遅延を最大8秒としており、この送信遅延によりスパイクが抑制できる

ことをシミュレーションにより示している。

端末制御方式は制御信号スパイクを抑制する技術としては有効であるが、スパイク抑制のために付与する通信遅延が、利用者の体感品質（QoE, Quality of Experience）に影響することが懸念される。そこで本章では、QoEがユーザの主観に大きく左右されることに鑑み、ユーザの心理的側面からこの課題にアプローチし、他の対策（設備投資や補償金の支払い等）よりも低コストで、通信遅延によるQoEの劣化を緩和する方式の提案と評価を行う。提案方式は、コンシェルジュによってユーザの注意を送信遅延からそらし、ユーザに通信遅延の発生を気付かせない方式となっている。提案方式の有効性を示すために、クラウドソーシングを利用した500名規模のユーザ評価実験を行った。

4.2 関連研究

通信遅延がユーザに与える影響や [81, 82, 83], QoE と通信遅延の関係性に関する調査結果 [84], ならびに通信遅延の影響を緩和するユーザインタフェースに関する従来研究がある [85, 86, 87].

4.2.1 通信遅延がユーザに与える影響調査

SmartBear 社によって行われた調査 [81] では、Web サイトにおけるユーザの待ち時間の許容範囲として、3秒が1つの目安になっていることが報告されている。Web ページが3秒以内に表示されなければ57%のユーザがそのサイトを閲覧することを諦めてしまい、待ち時間が1秒増加する毎に閲覧数は11%、ユーザの満足度は16%減少するという結果も報告されている。モバイルサイトの場合、この傾向はさらに顕著となっており、ユーザの60%が3秒以内に表示されることを期待していて、5秒以内に表示されなければ74%のユーザが別のサイトに移ってしまうという結果が報告されている。

また、他の従来研究 [82] では、モバイル付加価値サービスのサービス品質を評価するためのモデルを設計した。このモデルを用いて、サービス品質、知覚価値、顧客満足度、購入後の行動の間の関係について議論した結果、サービス品質を示す指標のうち「顧客サービスとシステムの信頼性」、「コンテンツの品質」、「接続速度」の3つの

項目が顧客満足度の相関があることが示されており（いずれも通信遅延は顧客満足度と相関がある3つ項目と関わることから）通信遅延がユーザの満足度に大きく影響することがわかる。

またさらに、情報セキュリティ技術に対するユーザの安心感の構造についての調査 [83] では、オンラインショッピングにおけるユーザ（情報セキュリティ技術の知識のないユーザ）の安心感について調査している。調査結果として「善意の認知」、「能力や誠実さの認識」、「ユーザの心象」、「企業に対する第三者の評判情報の認知」が安心感の要因として挙げられている。この内、「能力や誠実さの認識」の要因は、ユーザが主観的に「オンラインショッピングサイトが信頼に足る能力と誠実さを持っている」と判断している場合に、そのユーザがオンラインショッピングサイトに安心感を抱く傾向にあることを示している。通信遅延により応答時間が伸びてしまい、ユーザに「このオンラインショッピングサイトは設備投資が不十分である（能力と誠実さの欠如）」と判断されてしまうと、ユーザの安心感を損ねてしまう可能性があるといえる。

4.2.2 通信遅延と QoE の関係性に関する調査

近年、ネットワーク品質の評価指標として、サービス品質（QoS, Quality of Service）に加え、ユーザの体感品質（QoE, Quality of Experience）が重要視されている。顧客満足度の高いサービスを提供する上で、QoE のような主観的な評価基準を考慮することは重要であり、さまざまな研究がなされている。

従来研究 [84] は、ユーザの心理状態が QoE に与える影響について調査している。時間的制約を受けている状態の被験者群（以降、制約群）とタスクに集中する必要のない状態の被験者群（以降、ながら群）とそのどちらでもない被験者群（以降、対照群）に、Web 上で簡単な計算問題を 90 秒の制限時間で解くゲームを回答させ、サイト表示時の遅延に対する QoE 評価を行っている。ながら群では、ニュース番組を見ながら計算問題のタスクに回答させることで、集中しなくて良いような状況を作っている。挿入する遅延時間は、0～8 秒、10 秒、12 秒の計 11 種類である。結果、ながら群、対照群、制約群の順に 90 秒を短く感じ、遅延秒数が 1 秒増える毎の QoE 評価の低下率も、ながら群、対照群、制約群の順に小さくなることが報告されている。

こうした従来研究から、QoE の評価は、ユーザの心理状況等によって変化するた

め、さまざまな観点から QoE を評価することは非常に重要であるといえる。

4.2.3 通信遅延の QoE への影響を緩和するユーザインタフェースに関する研究

通信を含む処理の進行状態を表示する手法として、プログレスバーが代表的な手法として用いられている。処理状況を表示することは、通信遅延を含む、処理の遅延による QoE の低下を緩和する効果があるといわれている。また、QoE 低下を緩和する更なる方式として、一般的な形状のプログレスバーではなく、データのダウンロード画面に 1 コマ漫画を表示するようなアプローチも提案、実装されている。

どのようなプログレスバーがよりユーザにストレスを感じさせないかを調査した文献 [85] では、単色のプログレスバーと色が変化するプログレスバー、プログレスバーに波模様のアニメーションを表示した 3 種類のプログレスバーを比較している。結果、波模様のアニメーションを表示したプログレスバーが最もユーザにストレスを感じさせない方式であったという結果が報告されている。同じくプログレスバーの表示方法によるユーザの体感時間の変化を調査した文献 [86] では、プログレスバーの形状と表示速度によって、ユーザの体感時間が変わることを示している。

また、プログレスバーに加えて、利用者の興味を引きそうな情報をテキスト提示することで、通信遅延による QoE の低下を防ぐことを目的とした従来研究 [87] がある。結果、プログレスバー単体で表示するよりも、利用者が興味を引きそうな情報をテキスト表示する方が、同じ遅延時間であってもユーザの満足度を高く保つ効果があったことが示されており、さらに表示されるテキスト情報への利用者の興味度合いによって、その（満足度を高く保つ）効果変動することも示されている。

このように、通信遅延の QoE への影響を緩和するユーザインタフェースが従来行われており、各提案の効果が示されている。しかしながら従来研究では、プログレスバーのように、遅延が発生している状況そのものを利用者に提示するため、ユーザは遅延の存在そのものを知覚することとなる。

4.3 遅延による QoE 低下を緩和する方式

著者らは、通信遅延発生時の QoE 低下をより軽減するためには、通信遅延の発生そのものを知覚しない方式の方が、通信遅延の発生をユーザが知覚する従来研究より

高い効果が得られるのではと考え、そうしたユーザの知覚なく通信遅延を処理する方式の実現性について検討を行った。

4.3.1 提案方式

ユーザの知覚なく通信遅延を処理するため、通信遅延が発生した際にはユーザへの通知無く、ユーザの興味を引くようなコンテンツを端末画面上に表示することで、ユーザの注意を「(通常、知覚するために QoE の低下原因となる) 通信遅延」から「(通信遅延とは全く関係ない) コンテンツ」に逸らすこととする。

また、表示するコンテンツはイラスト (キャラクター、本章ではコンシェルジュと呼ぶ) が、利用者の興味を引くテキスト型のコンテンツを対話形式で表示することとした。これは、イラストの利用が、そのイラストに添えられた文章を読みたいと思わせる動機づけになり得るという人間の特性に注目している [88]。

また、コンシェルジュは (通信遅延の無い) 通常時においてもユーザに様々な情報を伝えるユーザ支援エージェントとして不定期に表示されるものとし、ユーザによるコンシェルジュの表示と通信遅延の発生の関係づけはできないこととする。

4.3.2 補償金による通信遅延の補償

検討のため、提案に加え、通信遅延に対して補償金によって直接的にユーザが被った不利益を補填することで QoE の低下を緩和する場合の効果を確認する。過去 MNO において大規模な通信障害が発生した際に、補償金 (通信障害により利用影響があった 3 日間分に相当する 700 円) が支払われた (請求額からの減算) 実績があり、補償金による通信遅延の補償が「通信遅延を許容するにあたってのインセンティブ」となり得ると考えている。

4.4 コンシェルジュの提示と補償金が通信遅延による QoE 低下軽減に与える影響

通信遅延の無い通常時から不定期に表示されるコンシェルジュが通信遅延時に提示方式と通信遅延時に補償金を支払う方式が QoE の変化に与える影響をユーザ実験により評価する。

4.4. コンシェルジュの提示と補償金が通信遅延による QoE 低下軽減に与える影響67

4.4.1 ユーザ実験において付与する通信遅延

本実験で用いる通信遅延は、端末制御方式で用いる通信遅延が最大 8 秒（通信遅延を付与する通信については、平均 4.5 秒）であることを考慮し、10 秒（付与する通信遅延+ネットワークそのものの遅延（最頻値 1.2 秒））または 5 秒（付与する通信遅延の平均）を用いることとした。

4.4.2 ユーザ実験環境

実験用の公開 Web サーバ（実験用 Web コンテンツ）を作成し、被験者は自身が所有するスマートフォンから実験用 Web コンテンツを操作する。実験用 Web コンテンツは、複数の画面遷移を伴うものであり、画面遷移の間に通信遅延を模した表示遅延を付与することで、実験環境としている。なお、実際の通信遅延による影響を実験から除外するため、実験用 Web コンテンツは最初に全ての画面が被験者のスマートフォンにダウンロードされる構成とし、実験用 Web コンテンツの中で HTML と JavaScript を用いてページ遷移（一般的にリンクやボタンを押下するごとに、Web サーバからコンテンツを取得し画面が切替わる）動作を模擬している。これにより、被験者はあたかもインターネット上の Web サーバとページ毎に通信しているように知覚することとなる。

4.4.3 実験用 Web コンテンツ

実験用 Web コンテンツの構成を図 24 とともに示す。本実験の被験者には Web による簡単な利用状況調査として依頼している。利用状況調査に用いた質問と回答を表 5 に示す。被験者は、自身が所有するスマートフォンを用いて、指定された URL（実験用の公開 Web サーバ）に接続することで、表 5 に示す 5 つの質問と回答が各質問と回答毎に 1 画面として表示される。本実験中、通信遅延なし、または 1 回か 2 回の通信遅延（1 回あたり 10 秒または 5 秒）を付与することとし、通信遅延を 2 回付与する場合には、質問 1 から質問 3（図 24[S1]）の後に遅延を付与する（この際、コンシェルジュの表示または何も表示せずに単なる遅延とする）（図 24[S2]）。さらに、通信遅延を 1 回または 2 回付与する場合には、質問 4 と質問 5（（図 24[S3]））の後に遅延を付与する（1 回の遅延付与の場合は初めて、2 回の遅延付与の場合は 2 回目）（（図 24[S4]））。

最後に QoE を確認するための満足度（7段階評価，とても不満・不満・やや不満・普段と変わらない・やや満足・満足・とても満足）とその理由の質問（図 24[S5]）と，多面的感情状態尺度（短縮版）[89] を利用したアンケート（図 24[S6]）を実施した．多面的感情状態尺度は「敵意」，「倦怠」，「活動的快」，「集中」等，その時の感情状態を因子に分け，それぞれの因子について 4段階評価（全く感じていない，あまり感じていない，少し感じている，はっきり感じている）するために用いた．これは，ユーザの心理状況が QoE に影響することを調査した従来研究 [84] の結果を踏まえ，被験者の感情状態を分析対象とするべきと考えたためである．

また，実験に用いたコンシェルジュのイラストを図 25 に，コンシェルジュが対話形式で表示するテキストを表 6 に示す．図 25 のイラスト¹については，事前調査を通じて著者らで検討して決定した．また，コンシェルジュとともに対話形式で表示するテキストについては，被験者の属性により興味に偏りが発生しないように一般的な雑学とした．表 6 に記載の 2 つのテキストは，通信遅延を 1 回付与する実験の場合には（テキスト 1）のみを，通信遅延を 2 回付与する実験の場合には（テキスト 1），（テキスト 2）の順に表示することとした．さらに，コンシェルジュを表示せずに補償金を与える場合には，QoE を確認する画面（図 24[S5]）において，お詫びの一文とともに補償金額が表示されることとした．

4.4.4 実験計画

実験に際し，10 種類の実験条件を設定した．設定した条件を表 7 に示す．被験者はクラウドソーシングサービス [90] を通じて募集し，各条件が 50 名以上となるように募集した．また，前後に実施した実験の影響を回避するために，各条件を実施した被験者に重複が無いように募集を行った（被験者間実験を採用した）．各被験者には，本実験に参加したことの報酬を 80 円支払っており，さらに補償金については 5 秒の遅延当たり 10 円を設定した（補償金 10 秒 1 回群と補償金 5 秒 2 回群は補償金 20 円（実験の報酬と合わせて 100 円）を，補償金 5 秒 1 回群については補償金 10 円（実験の報酬と合わせて 90 円）を支払った）．また，被験者には，今回のタスクは学術目的での依頼であることをあらかじめ伝えている．

¹GATAG (<http://free-illu.strations.gatag.net/>) で公開されているフリー素材を利用

4.4. コンシェルジュの提示と補償金が通信遅延による QoE 低下軽減に与える影響69

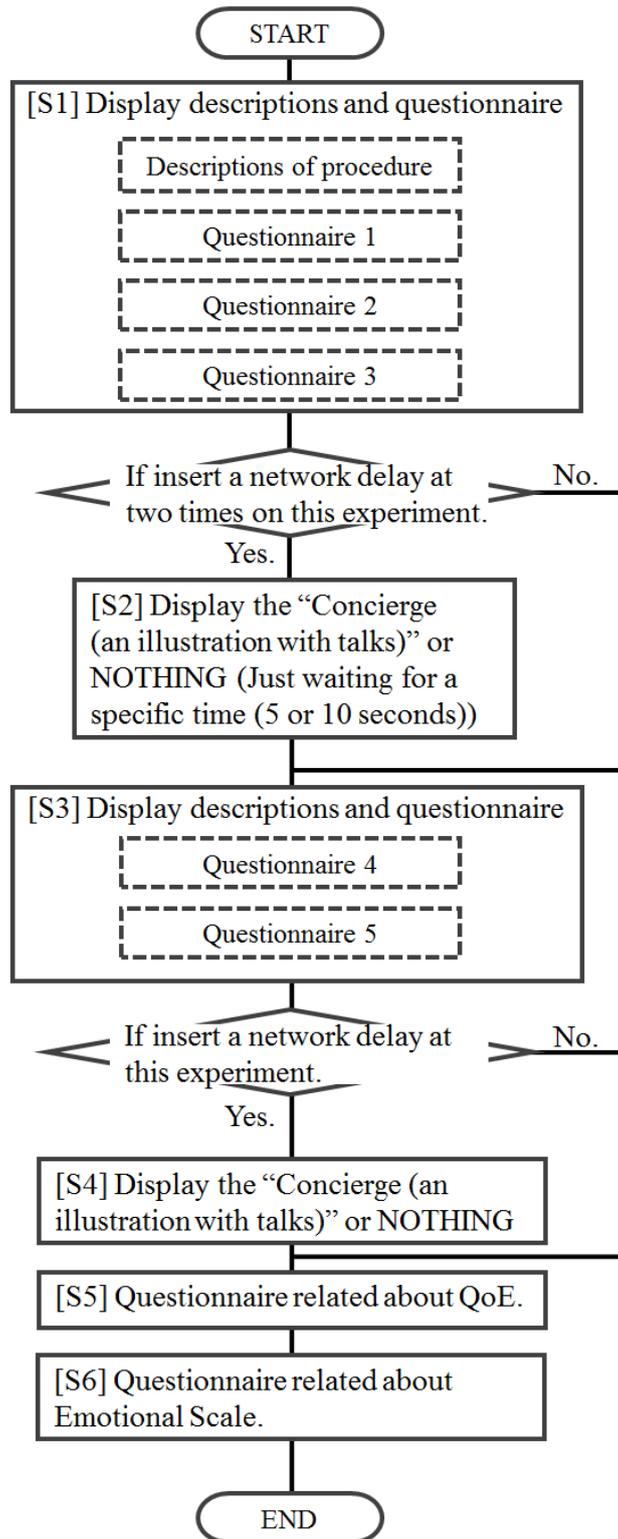


図 24: 実験用 Web コンテンツの処理フロー
Fig.24: Flowchart of experimental web content.



図 25: 実験に用いたコンシェルジュ (イラスト)
Fig.25: Concierge (an illustration) for the experiment.

4.5 実験結果と考察

分析に先立ち、著者ら（実験実施者）が全被験者の回答内容（満足度とその理由（図 24[S5]））を確認し、次の 3 つを基準に照らして信頼性の低い（回答内容に矛盾がある）と考えられる回答を分析対象外とした。

- 実験中の通信に対する満足度に対する質問において、被験者が平素体感している通信の満足度を回答しているとみなされるもの（具体的な解答例、「外出中に動画などのデータ量が多いものを利用していないので、不便を感じない」）。
- 実験とは関係のない別の要因が満足度の回答に関わっているとみなされるもの（具体的な解答例、「たまに通信が途切れることもあるが元々外でインターネットを見ることができなかったことを考えるとそこまで不満ではない」）。
- 満足度と理由に矛盾があると考えられるもの（具体的な解答例、「遅延は気にならない」という理由を選択しているにも関わらず満足度については「とても不満」を選択している被験者）。

4.5.1 被験者の満足度の分布

実験に用いた遅延毎の満足度の分布を図 26, 図 27, 図 28 にそれぞれ示す。遅延の長さ（10 秒または 5 秒）や回数（1 回または 2 回）によらず、対策なし群と比較して補償金群ならびに提案方式群の満足度が高い（図 26, 図 27, 図 28 の各図において、分布が右側に寄っている）ことがわかる。さらに、提案方式群については遅延の長さや回数によらず「普段と変わらない」と評価した被験者が一番多かった（図 26, 図 27, 図 28 の各図において、普段と変わらないと回答した被験者が一番多いのが提案方式群であった）。これらの結果は、通信遅延発生時の QoE 低下をより軽減するためには、通信遅延の発生そのものを知覚しない方式の方が、通信遅延の発生をユーザが知覚する従来研究より高い効果が得られるのではと想定し、そうしたユーザの知覚なく通信遅延を処理する方式を検討した設計が実験において機能していたためであると考えている。一部の被験者から、満足度の理由において「遅延が起きていることに気づけなかった」「豆知識が面白く、見入っていた」という回答が得られてことから、ユーザの知覚なく通信遅延を処理する方式が実現できているものと考えている。

一方で、方式なし 5 秒 1 回群において「普段と変わらない」と回答した被験者が多い（図 27 の方式なしが多い）。この被験者の満足度の理由を個別に確認したところ、多くの被験者が「普段でも 5 秒程度の遅れはある」「いつもよりスムーズに（ページが）切り替わった」という回答をしており、普段から 5 秒程度の遅延を体感している被験者が多いことを示す結果となった。

4.5.2 被験者の属性と満足度に対する分析

各実験群の間の満足度に統計的に有意な差があるかを確認することを目的に、図 26, 図 27, 図 28 に示した満足度を数値化した（とても不満：1, 不満：2, やや不満：3, 普段と変わらない：4, やや満足：5, 満足：6, とても満足：7 を割り当てた）上で、分散分析と下位検定（Tuley-Kramer 法）を実施した。検定結果を図 29 に示す。

まず、遅延なし群と方式なし、補償金、提案方式の各群との間には有意差があり、遅延が無い場合と比較して各群 QoE が低下している様子を確認した。提案方式群の 10 秒 1 回ならびに 5 秒 1 回の遅延に着目した場合、方式無し群との間に有意差が確認された（提案方式群の方が方式なし群と比較して QoE が高い）。このことから、提

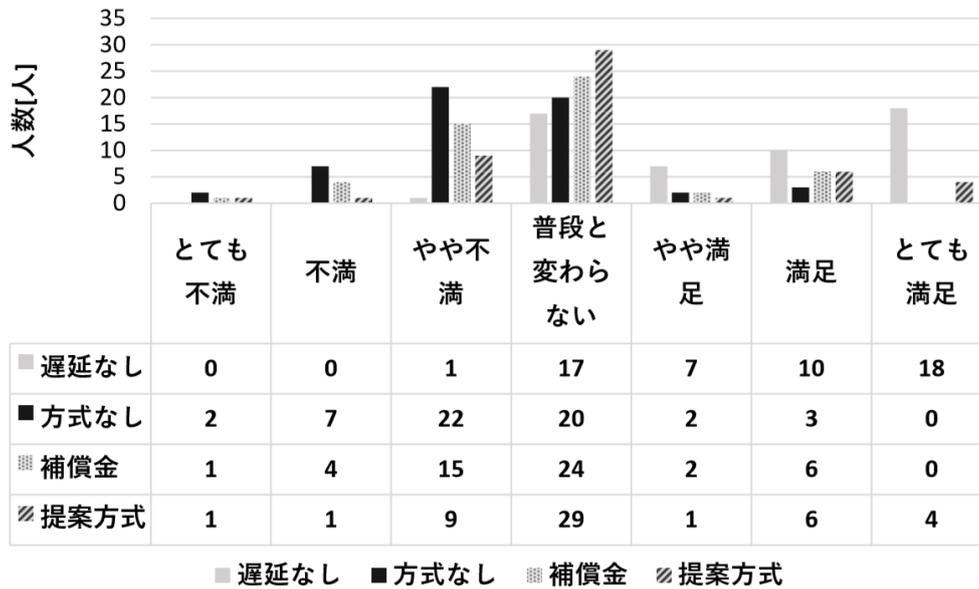


図 26: 10 秒 1 回の遅延を付与した被験者の満足度の分布

Fig.26: Distribution about QoE under the condition of 10 sec./1 time delay.

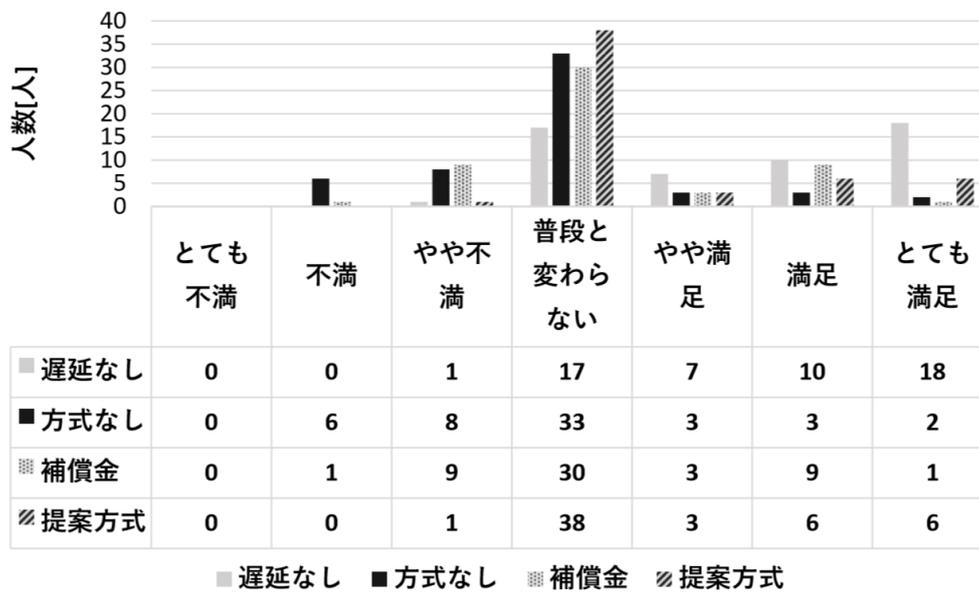


図 27: 5 秒 1 回の遅延を付与した被験者の満足度の分布

Fig.27: Distribution about QoE under the condition of 5 sec./1 time delay.

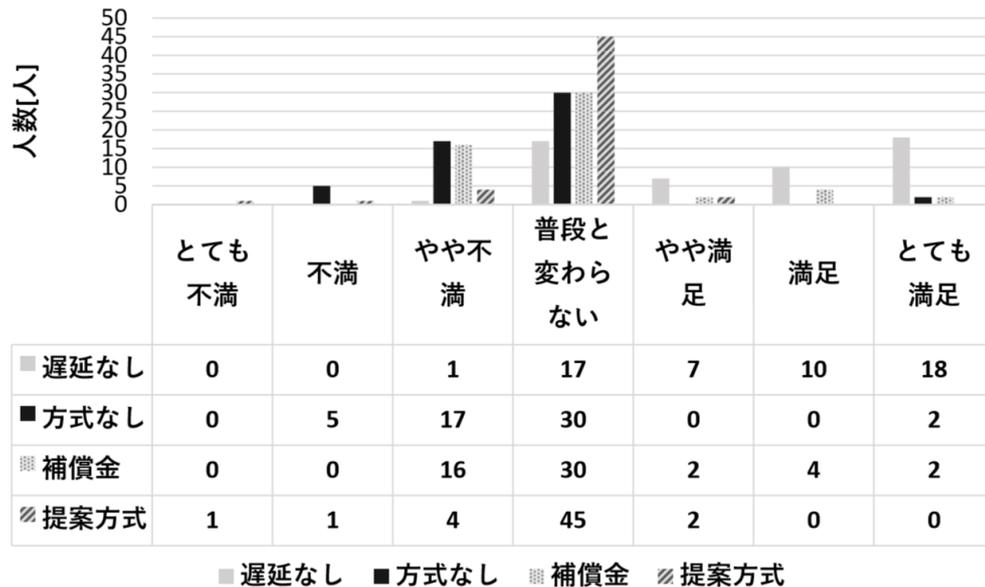


図 28: 5 秒 2 回の遅延を付与した被験者の満足度の分布

Fig.28: Distribution about QoE under the condition of 5 sec./2 times delay.

案方式群はコンシェルジュの表示によって、方式なし群（コンシェルジュや補償金なく、単に遅延が発生する場合）よりも QoE が改善していることがわかった。一方で、補償金群と提案方式群の間には、有意差が確認されず（満足度の平均値で確認した場合、提案方式群の方が高いが有意差は無い）、補償金と比較して提案方式が QoE を改善させる結果は得られていない。しかしながら、補償金群については、サービス提供者に直接的なコスト負担を強いる方式であり、そうした観点から提案方式が優れていると考えられる。

また、提案方式群の 5 秒 2 回の遅延に着目した場合には、他の条件と異なり、有意差が無い。このことと、提案方式 10 秒 1 回群は方式なし群との間に有意差があることから、提案方式の効果は遅延時間よりも実施の頻度によって減衰すると考えられる。

提案方式 5 秒 2 回群の QoE 調査（図 24[S5]）において「とても不満」、「不満」、「やや不満」と回答した被験者の理由を個別に確認したところ、「表示されたテキストの内容に興味がなかった」、「アンケート以外の表示があったため」というような意見が確認された。このことから、コンシェルジュとともに表示するテキストが「被験者にとって関心のあるコンテンツ」か否かが、QoE の改善効果に影響するという、従来研究 [87] でも見られた結果が本実験でも得られたと考えている。

		遅延なし群	方式なし群			補償金群		
			10秒1回	5秒1回	5秒2回	10秒1回	5秒1回	5秒2回
* : 有意差 (5%有意) あり								
- : 有意差なし								
■ : 条件が異なるため未検定								
方式なし群	10秒1回	*						
	5秒1回	*						
	5秒2回	*						
補償金群	10秒1回	*	-					
	5秒1回	*		-				
	5秒2回	*			-			
提案方式群	10秒1回	*	*			-		
	5秒1回	*		*			-	
	5秒2回	*			-			-

図 29: 満足度の差の検定結果

Fig.29: Result of statistical test between QoEs.

4.5.3 被験者の感情尺度と満足度に対する分析

実験で得られた満足度と多面的感情状態尺度の各因子との間の相関関係を確認したが、統計的に有意な要因間の差や交互作用は確認されていない。

4.6 まとめと今後の課題

本章では、大量の M2M デバイスが同時刻に一斉にネットワーク接続することでスパイクとなり、スパイクによる一時的な過負荷がネットワークの安定運用の阻害要因となり得ることに対して、通信端末が発する全ての通信に対し、プロトコルエラーとしない程度の短時間の送信遅延を付与することで、制御信号が発生するタイミングを分散する方式 UENAC がユーザの体感品質に与える影響に着目し、これを軽減する手法に関する検討を実施した。具体的には、通信遅延が発生した際にイラスト（コンシェルジュ）と対話形式のテキストをスマートフォンの画面に表示し、ユーザの注意をそらすことによって、ユーザに通信遅延の発生そのものを知覚させない方式を提案した。

提案方式の評価のために 500 名規模のユーザ実験を実施した。ユーザ実験を通じて、

コンシェルジュとテキストを表示する提案方式が通信遅延による QoE 低下を緩和できていることを示した。また、通信遅延に対し補償金を支払う方式に対しても、統計的な有意差は確認されないものの高い QoE を示しており、補償金を用いる方式よりもコスト的な観点で優位性があることを示した。

一方、コンシェルジュとテキストによる提案方式は、実施の頻度によってその効果が減衰する示唆を得ており、実施頻度による減衰を軽減する方式の検討が今後必要と考えている。

表 5: 実験用 Web コンテンツに用いた質問と回答

Table 5: Questionnaires and answers on experimental web content.

質問	回答
(質問 1) 年代	<ul style="list-style-type: none"> ・ 10 代以下 ・ 20 代 ・ 30 代 ・ 40 代 ・ 50 代 ・ 60 代以上
(質問 2) 性別	<ul style="list-style-type: none"> ・ 男性 ・ 女性
(質問 3) 普段のスマートフォンの利用において、 通信速度に満足しているか	<ul style="list-style-type: none"> ・ 満足している ・ あまり満足していない ・ どちらでもない ・ まあまあ満足している ・ 満足している
(質問 4) スマートフォンで YouTube 等の動画 視聴サイトを見るとき、動画が途切 れることがどの程度あるか	<ul style="list-style-type: none"> ・ ほとんどない ・ あまりない ・ たまにある ・ まあまあある ・ かなりある ・ 動画視聴サイトは見ない
(質問 5) あなたのインターネットに関する 知識レベルはどの程度か	(低いから高いの 7 段階評価で回答)

表 6: コンシェルジュとともに表示したテキスト

Table6: Talks displayed with concierge.

(テキスト 1)	日本における『猫の日』は、2月22日となっています。 1987年に制定されました。
(テキスト 2)	2月22日が選ばれた理由は猫の鳴き声の 『にゃん(2)にゃん(2)にゃん(2)』から名前を付けています。

表 7: 実験条件

Table7: Experimental conditions.

	対策	遅延	実験群の呼称
(条件 1)	なし	なし	遅延なし群
(条件 2)	なし	10秒 1回	方式なし 10秒 1回群
(条件 3)		5秒 1回	方式なし 5秒 1回群
(条件 4)		5秒 2回	方式なし 5秒 2回群
(条件 5)	補償金	10秒 1回	補償金 10秒 1回群
(条件 6)		5秒 1回	補償金 5秒 1回群
(条件 7)		5秒 2回	補償金 5秒 2回群
(条件 8)	コンシェルジュ	10秒 1回	提案方式 10秒 1回群
(条件 9)		5秒 1回	提案方式 5秒 1回群
(条件 10)		5秒 2回	提案方式 5秒 2回群

第5章 おわりに

本研究では、日本のみならず世界的に急速に進む高齢化と一部地域における少子化が内需の縮小をもたらし、経済成長を直接的に阻害する要因となり得ることに触れ、経済成長を持続するためには技術進歩が必要不可欠であることを述べた。本研究の対象である ICT 分野では (1)M2M/IoT, (2) ビッグデータ, (3) 人工知能 (AI) の 3 分野が技術進歩を実現する分野として注目が集まっており、その中でも (2) ビッグデータや (3) 人工知能の実現には、まずはデータ集約が必要であることから、著者らは (1)M2M/IoT の実現に着目した。

M2M/IoT の実現のための技術課題として、想定され得るネットワーク構成やそれを支える移動体通信事業者が取り巻く状況について整理した上で、次の 3 つの技術課題を設定した。

(課題 1) 煩雑な M2M デバイスのインターネット接続設定が普及の阻害要因となる。(課題 2) ネットワーク設備における瞬間的な輻輳が設備障害を誘発する。(課題 3) ネットワークの輻輳制御がユーザの体感品質低下を招く。

設定した 3 つの技術課題を解決することで、誰もが利用可能な M2M/IoT を実現し、技術進歩を実現することで持続的な経済成長に関わる課題解決に貢献することを目指した。

2 章では、技術課題 1(煩雑な M2M デバイスの接続設定が普及の阻害要因となる) を解決した。具体的には、近距離無線通信のみを利用する M2M デバイスを一般消費者が利用する場面を想定し、この接続設定が煩雑であるために、M2M の普及の阻害要因となる可能性について言及し、解決策の提案と、提案に基づく実装、一般消費者を想定した展示会におけるコンセプトデモ出展を通じた 380 名へのアンケート調査を実施した。提案の実装を通じて、提案が技術的に実現可能であることを、また、一般消費者を想定したコンセプトデモの展示を通じて得られたアンケート調査の結果から、提案が十分に受容性のあるものであることを示した。これらを通じて、M2M を実現するための課題である接続設定の煩雑さの解消を行った。

また、3章では、技術課題2(ネットワーク設備における瞬間的な輻輳が設備障害を誘発する)を解決した。具体的には、M2M デバイスが大量かつ同時刻に接続した場合に、広域網を構成する設備に悪影響を与え、通信設備の安定性を阻害する要因となり得ることを示した。この問題に対し、端末毎に数秒程度の送信遅延を付与することでこうした影響を除外する技術を提案した上で、提案に基づく実装と、シミュレーションによる評価を実施した。提案の実装を通じて、提案が既存の機器においても実現可能であることと既存のアプリケーションに悪影響が無いことを示すとともに、シミュレーションの評価結果を通じて、数秒程度の遅延が通信設備の負荷を削減し課題の解決が可能であること示した。

またさらに、4章では、技術課題3(輻輳制御がユーザの体感品質低下を招く)を解決するため、輻輳制御が実施された場合に発生する通信遅延がもたらす体感品質の低下を軽減する具体的な方式について基礎検討を実施した。さらに、検討した方式については500名規模のユーザ実験を実施し、その有効性を示した。

以上、本研究ではあらかじめ設定した3つの課題につて、それぞれ解決に至った。そのため、本研究を通じた上記の課題解決を通じて、誰もが利用可能なM2Mを実現し、今後世界が直面する持続的な経済成長に関わる課題解決に貢献できたと考えている。

謝辞

本編の執筆に際し多くのご支援とご協力を賜りました。謹んで御礼を申し上げます。西垣 正勝教授には言葉に尽くしきれない感謝の意を表したいと思います。著者が24歳の時に修士課程を修了した際の指導教員も西垣 正勝教授でした。

その後、社会人となり私企業（KDDI 研究所，現 KDDI 総合研究所）の研究者となりましたが，修士課程修了までに得たことに何度も助けられました。また，私企業の研究者時代に直接的にご指導を頂いた鈴木 正敏様，長谷川 亨様，阿野 茂浩様，堀内 浩規様，吉原 貴仁様，井戸上 彰様，大岸 智彦様をはじめとする諸先輩方に深く感謝いたします。諸先輩方に恵まれ，本当に楽しく研究に取り組むことができました。

そうした中で，博士を取得したいという気持ちが自然と芽生え，西垣 正勝教授に相談したところ指導教員を快くお引き受け頂けました。本当にありがとうございます。また，打合せを通じて，そうした相談の機会を作っていただいた峰野 博史准教授にも深く感謝申し上げます。

最後に良きパートナーとして支えてくれた妻と日々の活力を与え続けてくれた2人の子供たちに心から感謝します。

参考文献

- [1] 総務省, “情報通信白書平成 28 年版,” 情報通信白書 .
<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/> [online] accessed at 1st August 2017
- [2] 総務省統計局, “平成27年国勢調査”. <http://www.stat.go.jp/data/kokusei/2015/> [online] accessed at 1st August 2017
- [3] 国立社会保障・人口問題研究所, “日本の将来推計人口（平成24年1月推計）”.
<http://www.ipss.go.jp/syoushika/tohkei/newest04/gh2401.asp> [online] accessed at 1st August 2017
- [4] 内閣府, “平成 28 年版高齢社会白書,” 高齢化白書 .
<http://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2016/html/zenbun/> [online] accessed at 1st August 2017
- [5] United Nations, “World Population Prospects : The 2015 Revision”.
<https://esa.un.org/unpd/wpp/> [online] accessed at 1st August 2017
- [6] 総務省, “平成 26 年全国消費実態調査,” 全国消費実態調査 .
<http://www.stat.go.jp/data/zensho/2014/> [online] accessed at 1st August 2017
- [7] “特定通信・放送開発事業実施円滑化法 第五条二項”. <http://law.e-gov.go.jp/htmldata/H02/H02HO035.html> [online] accessed at 1st August 2017

- [8] 内閣府, “平成 25 年度 年次経済財政報告 第 3 章第 3 節 社会インフラの供給基盤”.
<http://www5.cao.go.jp/j-j/wp/wp-je13/13.html> [online] accessed at 1st August 2017
- [9] ETSI, “Machine-to-Machine communications (M2M); functional architecture,”
ETSI TS 102 690, 2011.
- [10] IHS Technology, “分野・産業別の IoT デバイス数及び 成長率”.
<https://technology.ihs.com> [online] accessed at 1st August 2017
- [11] Wi-Fi Alliance. <https://www.wi-fi.org/> [online] accessed at 1st August 2017
- [12] Bluetooth technology. <http://www.bluetooth.com> [online] accessed at 1st August 2017
- [13] J. Huang, et al., “BlueID: A practical system for bluetooth device identification,”
Proceedings of IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM)
2014, pp.2849–2857, 2014.
- [14] IETF, “Bootstrap protocol (bootp),” RFC 951.
<https://tools.ietf.org/html/rfc951> [online] accessed at 1st August 2017
- [15] IETF, “Dynamic host configuration protocol (dhcp),” RFC 2131.
<https://tools.ietf.org/html/rfc2131> [online] accessed at 1st August 2017
- [16] IETF, “Dynamic host configuration protocol for ipv6 (dhcpv6),” RFC 3315.
<https://tools.ietf.org/html/rfc3315> [online] accessed at 1st August 2017
- [17] W3C, “Simple object access protocol (soap)”. <http://www.w3.org/TR/soap/>
[online] accessed at 1st August 2017
- [18] IETF, “Universal plug and play (upnp),” RFC 6970.
<https://tools.ietf.org/html/rfc6970> [online] accessed at 1st August 2017

- [19] Microsoft, “Link Layer Topology Discovery Protocol Specification”.
<https://msdn.microsoft.com/en-us/library/windows/hardware/gg463061.aspx>
[online] accessed at 1st August 2017
- [20] M.K. Chong, et al., “A survey of user interaction for spontaneous device association,” ACM Computing Surveys (CSUR), vol.47 Issue 1, Article No. 8, July 2014.
- [21] “電波法 第二章 無線局の免許等 第四条”. <http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S25/S25HO131.html> [online] accessed at 1st August 2017
- [22] 総務省, “2020年代に向けたモバイル分野の競争政策の在り方,” 情報通信審議会 2020-ICT 基盤政策特別部会基本政策委員会 (第7回) 配布資料・議事録.
http://www.soumu.go.jp/main_content/000294417.pdf [online] accessed at 1st June 2017
- [23] 総務省, “電気通信サービスの契約数及びシェアに関する四半期データの公表 (平成28年度第3四半期 (12月末))”. http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban04_02000121.html [online] accessed at 1st June 2017
- [24] M. Gupta, et al., “Energy impact of emerging mobile internet applications on LTE networks: Issues and solutions,” IEEE Communications Magazine, pp.90–97, Feb. 2013.
- [25] Y. Choi, et al., “The impact of application signaling traffic on public land mobile networks,” IEEE Communications Magazine, pp.166–172, Jan. 2014.
- [26] 総務省, “携帯電話の電場番号数の拡大に向けた電気通信番号に係る制度等の在り方 答申,” 情報通信審議会資料, 2011.

- [27] IEEE SPECTRUM, “Popular internet of things forecast of 50 billion devices by 2020 is outdated”. <http://spectrum.ieee.org/tech-talk/telecom/internet/popular-internet-of-things-forecast-of-50-billion-devices-by-2020-is-outdated> [online] accessed at 1st August 2017
- [28] S. Michael, “System architecture challenges in the home m2m network,” Proceedings of Application and Technology Conference (LISAT) 2010, pp.1–7, 2010.
- [29] Bluetooth SIG, “Bluetooth specification version 4.2.”.
- [30] K. Hinckley, “Synchronous gestures for multiple persons and computers,” Proceedings of the 16th annual ACM symposium on User Interface Software and Technology (UIST), pp.149–158, 2003.
- [31] J. Rekimoto, “SyncTap: synchronous user operation for spontaneous network connection,” Pers Ubiquit Comput 2004, pp.126–134, 2004.
- [32] K. Seewoonauth, et al., “Touch & Connect and Touch & Select: Interacting with a computer by touching it with a mobile phone,” Proceedings of the 11th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services (MobileHCI), Article No. 36, 2009.
- [33] M.K. Chong and H.W. Gellersen, “How groups of users associate wireless devices,” Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI), pp.1559–1568, 2013.
- [34] M. Roman, et al., “A middleware infrastructure for active spaces,” IEEE Pervasive Computing, vol.1 Issue 4, pp.74–83, 2002.
- [35] U. Hengartner and P. Steenkiste, “Implementing access control to people location information,” Proceedings of 9th ACM Symposium on Access Control Models and Technologies (SACMAT), pp.11–20, 2004.
- [36] Allseen Alliance, “Alljoyn”. <https://allseenalliance.org/> [online] accessed at 1st August 2017

- [37] Eclipse, “Kura”. <https://eclipse.org/kura/> [online] accessed at 1st August 2017
- [38] Open Mobile Alliance (OMA), “Device Management Protocol (DM),” OMA-TS-DM_Protocol-V1_2, 2007.
- [39] Broadband Forum (BBF), “CPE WAN Management Protocol (TR-069),” 2007. Ver. 1.1, Issue 1, Amendment 1.
- [40] F. Stajano, et al., “The resurrecting duckling: Security issues for ad-hoc wireless networks,” Proceedings of the 7th International Workshop on Security Protocols, pp.172–194, 1999.
- [41] T.G. Zimmerman, “Personal area networks: Near-feld intrabody communication,” IBM Syst, vol.J. 35, 3-4, pp.609–617, 1996.
- [42] D.G. Park, et al., “Context aware service using intra-body communication,” Proceedings of the 4th Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications, pp.84–91, 2006.
- [43] D.G. Park, et al., “Tap: Touch-and-play,” Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing System, pp.677–680, 2006.
- [44] K. Hachisuka, et al., “Intra-body data transmission for the personal area network,” Microsystem Technologies 11, 8, pp.1020–1027, 2005.
- [45] NFC FORUM, “NFC”. <http://nfc-forum.org>
- [46] A. Hang, et al., “Visual design of physical user interfaces for NFC-based mobile interaction,” Proceedings of the 8th ACM Conference on Designing Interactive Systems (DIS), pp.292–301, 2010.
- [47] D. Schmidt, et al., “PhoneTouch: A technique for direct phone interaction on surfaces,” Proceedings of the 23rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST), pp.13–16, 2010.

- [48] L.E. Holmquist, et al., “Smart-its friends: a technique for users to easily establish connections between smart artefacts,” Proceedings of the 3rd international conference on Ubiquitous Computing (UbiComp), pp.116–122, 2001.
- [49] S.N. Patel, et al., “A gesture-based authentication scheme for untrusted public terminals,” Proceedings of the 17th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST), pp.157–160, 2004.
- [50] D. Bichler, et al., “Key generation based on acceleration data of shaking processes,” Proceedings of the 9th International Conference on Ubiquitous Computing (UbiComp), pp.304–317, 2007.
- [51] D. Kirovski, et al., “Themartinisynch: Joint fuzzy hashing via error correction,” Proceedings of the 4th European Conference on Security and Privacy in Ad-Hoc and Sensor Networks (ESAS), pp.16–30, 2007.
- [52] D. Kirovski, et al., “The martini synch: Device pairing via joint quantization,” Proceedings of the 2007 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT), pp.466–470, 2007.
- [53] R. Mayrhofer and H. Gellersen, “Shake well before use: Authentication based on accelerometer data,” Proceedings of the 5th International Conference on Pervasive Computing (PERVASIVE), pp.144–161, 2007.
- [54] R. Mayrhofer and H. Gellersen, “Shake well before use: Intuitive and secure pairing of mobile devices,” IEEE Transactions, Mobile Computing 8, 6, pp.792–806, 2009.
- [55] M.K. Chong and H. Gellersen, “Classification of spontaneous device association from a usability perspective,” Proceedings of the 2nd International Workshop on Security and Privacy in Spontaneous Interaction and Mobile Phone Use (IWSSI/SPMU), pp.1–7, 2010.

- [56] M.K. Chong and H. Gellersen, “Usability classification for spontaneous device association,” *Personal Ubiquitous Computing* 16, 1, pp.77–89, 2012.
- [57] J. Rekimoto, et al., “SyncTap: An interaction technique for mobile networking,” *Human-Computer Interaction with Mobile Device and Services (Lecture Note in Computer Science)*, pp.104–115, 2003.
- [58] J. Rekimoto, et al., “Proximal interactions: A direct manipulation technique for wireless networking,” *INTERACT IOS Press*, pp.511–518, 2003.
- [59] J. Rekimoto, et al., “ProxNet: Secure dynamic wireless connection by proximity sensing,” *Pervasive Computing (Lecture Notes in Computer Science)*, pp.213–218, 2004.
- [60] Family Discount. <http://www.au.kddi.com/english/mobile/charge/basic-charge-discount/family-discount/> [online] accessed at 1st August 2017
- [61] 総務省, “資料 2-3 固定系超高速ブロードバンドに関する事業者間連携サービスの動向,” 「平成 26 年度 競争評価アドバイザーボード」第 2 回会合会議資料, 2014.
- [62] J. Han, et al., “MVSec: secure and easy-to-use pairing of mobile devices with vehicles,” *Proceedings of the 2014 ACM conference on Security and privacy in wireless & mobile networks (WiSec)*, pp.51–56, 2014.
- [63] ITPro EXPO. <http://itpro.nikkeibp.co.jp/expo/> [online] accessed at 1st August 2017
- [64] Open Mobile Alliance, “Always Online Infrastructure (AOI)”. http://member.openmobilealliance.org/ftp/Public_documents/CD/AOI/ [online] accessed at 1st August 2017
- [65] GSMA Technical Projects, “Smarter Apps for Smarter Phones”. <http://gsmaterminals.github.io/Developer-Guidelines-Public/> [online] accessed at 1st August 2017

- [66] GSMA Technical Projects, “Background Foreground modes,” http://gsmaterminals.github.io/Developer-Guidelines-Public/#4_6_background_foreground_modes [online] accessed at 1st August 2017
- [67] Qualcomm, “Managing Background Data Traffic in Mobile Devices,” Qualcomm Incorporated, January 2012. <http://www.qualcomm.com/media/documents/managing-background-data-traffic-mobile-devices> [online] accessed at 1st August 2017
- [68] 3GPP, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) Radio Resource Control (RRC),” Protocol Specification, 3GPP TS 36.331, Rel. 10, V10.7.0, Sept. 2012.
- [69] A. Ghosh, et al., “LTE-Advanced: Next-Generation Wireless Broadband Technology,” IEEE Wireless Communications, vol. Vol. 17, Issue. 3, pp.10–22, June 2010.
- [70] 3GPP, “System Enhancements for User Plane Congestion Management (UPCON),” 3GPP TR 23.705, Rel. 13, V1.0.0, Aug. 2014.
- [71] Google Inc., “Android Developers”. <http://developer.android.com/> [online] accessed at 1st August 2017
- [72] Open Source Cross Reference, “Source of Android 4.1.2 r2”. http://osxr.org/android/source/bionic/libc/netbsd/resolv/res_init.c [online] accessed at 1st March 2014
- [73] J. Hui, et al., “T-Mobile QoE lab: making mobile browsing faster and open research problems,” Proceedings of the 19th annual international conference on Mobile computing & networking (MobiCom) 2013, pp.239–242, Sept. 2013.
- [74] The netfilter.org, “iptables project”. <http://www.netfilter.org/projects/iptables/> [online] accessed at 1st August 2017

- [75] The netfilter.org, “libnetfilter queue project”. http://www.netfilter.org/projects/libnetfilter_queue/index.html [online] accessed at 1st August 2017
- [76] Google Inc., “Google Play”. <https://play.google.com/store/apps> [online] accessed at 1st August 2017
- [77] J. Yang, “Characterizing Smartphone Traffic with MapReduce,” Proceedings of 16th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC) 2013, pp.1–5, June 2013.
- [78] 3GPP, “Technical Specification Group Radio Access Network, LTE Radio Access Network (RAN) enhancements for diverse data applications (Release 11),” 3GPP TR 36.822, V11.0.0, Sept. 2012.
- [79] 総務省, “電気通信サービスの事故発生状況 (平成 24 年度)”. http://www.soumu.go.jp/main_content/000246841.pdf [online] accessed at 1st August 2017
- [80] D. Arai, et al., “UE-based network access timing control scheme for avoiding signaling spikes,” Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Communications (ICC), pp.3604–3609, 2015.
- [81] SmartBear Software, “The Cost of Poor Web Performance [INFOGRAPHIC]”. <http://blog.smartbear.com/web-performance/the-cost-of-poor-web-performance-infographic/> [online] accessed at 1st August 2017
- [82] Y.F. Kuo, et al., “The relationships among service quality, perceived value, customer satisfaction, and post-purchase intention in mobile value-added services,” Computers in Human Behavior, vol.25, pp.887–896, July 2009.
- [83] 西岡大他, “オンラインショッピングにおける情報セキュリティ技術に対する知識のないユーザの安心感の構造,” コンピュータセキュリティシンポジウム (CSS) 2012 論文集, pp.555–562, 2012.

- [84] 江口真人他, “ユーザの状況要因が qoe 評価に与える影響のモデル化,” 電子情報通信学会技術研究報告 CQ2010-52, pp.23–28, 電子情報通信学会 コミュニケーションクオリティ (CQ) 研究会, 2010.
- [85] C. Harrison, et al., “Faster progress bars: manipulating perceived duration with visual augmentations,” Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI), pp.1545–1548, 2010.
- [86] H. Zhang, et al., “Cross-over study of time perception and interface design,” Proceedings of Human-Computer Interaction: Design and Evaluation (HCI), pp.105–116, 2015.
- [87] S. Niida, et al., “Design requirements for improving qoe of web service using time-fillers,” IEICE Transactions on Communications, vol.E96.B no. 8, pp.2069–2075, 2013.
- [88] 島田英昭他, “挿絵がマニュアルの理解を促進する認知プロセス-動機づけ効果と精緻化効果-,” 日本教育心理学研究, 第 56 巻, pp.474–486, 2008.
- [89] 寺崎正治他, “多面的感情状態尺度・短縮版の作成,” 日本心理学会第 55 回大会発表論文集, pp.350–356, 1991.
- [90] Lancers, “クラウドソーシング・ランサーズ”. <http://www.lancers.jp/> [online] accessed at 1st August 2017