

修士論文

効用関数に基づく無線通信方式の選択手法



2014 年 2 月 6 日

指導教員 相田 仁 教授

東京大学大学院 工学系研究科
電気系工学専攻

37-126437 蟹江 教佳

概要

同時に2つ以上の無線インターフェースを用いる複数経路無線通信は、より速い通信を可能とする一方、モバイル端末が消費する電力量も大きいと考えられる。しかし、スマートフォンなどにおいて消費電力が問題として取り上げられているように、ユーザーの要求は通信速度のみではなく、消費電力などと言った事にも向けられている。

そこで本論文では、モバイル端末における通信方式の選択方法として、通信中に消費される電力と通信速度を考慮した選択手法について提案した。提案手法を用いることによって、どういった通信方式を用いるのが良いのかを通信速度と消費電力の両方の観点から判断する事ができる。選択手法に、通信速度や消費電力から人が感じる満足度である効用値を取り入れる事で、よりユーザーに合った通信方式を選択することができる。

また、アンケートによって、いくつかの時間帯、端末の電池残量における効用関数の構築を行った。時間帯が遅い程、また端末の電池残量が多い程通信速度を求める傾向がある事を確認した。さらに Android 端末を用いて、電波状態の良い無線 LAN、電波状態の悪い無線 LAN、LTE、HSDPA において、その消費電力、通信速度を測定し、時間帯や電池残量によって、ユーザーが良いと感じる無線通信方式が変わる事を確認し、提案手法の有効性があることを示した。

目次

第 1 章	序論	1
1.1	はじめに	2
1.2	本論文の構成	3
第 2 章	研究の背景	5
2.1	関連研究	6
2.1.1	CoolSpots	6
2.1.2	無線 LAN、3G 間での切り替え	8
2.1.3	無線 LAN、LTE 間での切り替え	9
2.2	複数経路無線通信	11
2.2.1	ARMS	11
2.2.2	pTCP	12
2.2.2	ミドルウェア	13
第 3 章	通信方式の選択手法	15
3.1	効用関数	16
3.2	モバイル端末におけるバッテリーの問題	17
3.3	多目的意思決定法	19
3.3.1	階層化意思決定法	20
3.3.2	多属性効用関数法	22
3.4	通信方式の選択モデル	23
第 4 章	通信方式選択の有効性の検証	27
4.1	通信速度の効用関数	28
4.2	消費電力の効用関数	31
4.3	通信速度と消費電力の多属性効用関数	35
4.4	評価実験	40
4.4.1	実験概要	40

4.4.2 実験結果と考察	43
第5章 実環境における検討	51
第6章 結論	55
6.1 まとめ	56
6.2 今後の課題	56
謝辞	58
参考文献	59
発表文献	62

図目次

図 1 : CoolSpots の概要[3]	6
図 2 : 切り替え手法の評価[3]	7
図 3 : Wi-Fi から 3G へのハンドオーバー[4]	8
図 4 : MultiNets のアーキテクチャ[5]	9
図 5 : LTE から無線 LAN への切り替え手法[6]	10
図 6 : 無線 LAN から LTE への切り替え手法[6]	10
図 7 : ARMS の概観[9]	12
図 8 : pTCP の概観[12]	13
図 9 : ミドルウェアとネットワーク層での帯域集約との比較[16]	14
図 10 : 料金 4 千円 (左図) と 7 千円 (右図) での MOS 値と待ち時間の関係[18]	17
図 11 : バッテリーに関する満足度調査[19]	18
図 12 : モバイル技術の発展[20]	18
図 13 : 多目的意思決定法	19
図 14 : 階層化意思決定法の階層図[25]	20
図 15 : 通信方式選択の階層化モデル	24
図 16 : 通信方式選択の意思決定の属性モデル	26
図 17 : 評価用紙 (通信速度)	29
図 18 : アンケートの表示画面	29
図 19 : ダウンロード時間に対する効用関数	30
図 20 : 通信速度に対する効用関数	31
図 21 : 評価用紙 (消費電力)	32
図 22 : 朝 8 時、電池残量 100% 時の消費電力に対する効用関数	32
図 23 : 朝 8 時における効用関数	33
図 24 : 昼 12 時における効用関数	33
図 25 : 夜 18 時における効用関数	33
図 26 : 消費電力優先な場合を対象とした無差別な点の導出	36
図 27 : 通信速度優先な場合を対象とした無差別な点の導出	37
図 28 : 朝 8 時における多属性効用関数	38

図 2 9 : 昼 1 2 時における多属性効用関数	39
図 3 0 : 夜 1 8 時における多属性効用関数	39
図 3 1 : モバイル電力測定器	41
図 3 2 : 電流の測定方法	42
図 3 3 : Network Log とモバイル電力測定器の同期	42
図 3 4 : 無線通信方式毎の消費電力	44
図 3 5 : LTE の RRC_CONNECTED 状態の維持	45
図 3 6 : 朝 8 時に 65Kbytes の Web ページをダウンロードした時の効用値	46
図 3 7 : 昼 1 2 時に 65Kbytes の Web ページをダウンロードした時の効用値	46
図 3 8 : 夜 1 8 時に 65Kbytes の Web ページをダウンロードした時の効用値	46
図 3 9 : 朝 8 時に 506Kbytes の Web ページをダウンロードした時の効用値	47
図 4 0 : 昼 1 2 時に 506Kbytes の Web ページをダウンロードした時の効用値	47
図 4 1 : 夜 1 8 時に 506Kbytes の Web ページをダウンロードした時の効用値	47
図 4 2 : 朝 8 時に 1.15Mbytes の Web ページをダウンロードした時の効用値	48
図 4 3 : 昼 1 2 時に 1.15Mbytes の Web ページをダウンロードした時の効用値	48
図 4 4 : 夜 1 8 時に 1.15Mbytes の Web ページをダウンロードした時の効用値	48
図 4 5 : LTE による通信における通信による消費電力	53
図 4 6 : 通信方式選択のフローチャート	53

表目次

表 1 : CoolSpots の切り替え手法[3]	7
表 2 : 一対比較行列	21
表 3 : 推定された関数の係数	34

第 1 章 序論

1.1 はじめに

近年、無線通信技術は急速に発展しており、我々の日常生活に深く浸透している。駅や図書館などの公共空間だけでなく、喫茶店やファストフード店といった飲食店やコンビニエンスストアなどで、無料で無線LAN(Local Area Network)が提供されるなど、誰でもいつでも自由に無線通信が利用できる。またスマートフォンやノートパソコンといった無線通信が可能なモバイル端末は、日々研究、開発が行われ、広く普及している。

このような状況の背景としては、無線通信の大きな特徴であるコードレス化が挙げられる。このコードレス化により、我々は設置場所を限定されることなく、無線ネットワークに接続しながら自由に移動することができる。しかし一方で、電波により通信するため、有線通信などに比べて、パケットロスが多く、通信速度が遅いといったデメリットがある。また、多くの人に用いられているモバイル端末の中には、複数の無線インターフェースを持つモバイル端末は数多く存在する[1]。搭載されている無線インターフェースとして代表的なものとしては、無線LANやWiMAX(Worldwide Interoperability for Microwave Access)、HSDPA(High Speed Downlink Packet Access)などの第三代通信技術(以下3Gと記す)やLTE(Long Term Evolution)などの携帯電話網の通信インターフェースが挙げられる。しかし、複数の無線インターフェースを持っていたとしても、同時に複数の無線インターフェースを用いず、単一の無線インターフェースで通信している。例えば、自宅やオフィスなどの無線LAN利用可能環境では、無線LANを優先的に用い、無線LANのない屋外では携帯回線を使う、といったことを行う。この事は、今日の無線環境を効率的に活用できているとはいえず[2]、このような状況に対して、同時に2つ以上の無線インターフェースを用いる複数経路無線通信の研究が行われている。

複数経路無線通信は、より速い通信を可能とする一方、モバイル端末が消費する電力量も大きいと考えられる。しかし、スマートフォンなどにおいて消費電力が問題として取り上げられているように、ユーザーの要求は通信速度のみではなく、消費電力などといった事にも向けられている。そのため、通信速度が大きい通信方式を単に選ぶだけでは、ユーザーのニーズを満たすことはできないと考えられる。

本研究では、モバイル端末における通信方式の選択方法として、無線通信利用時における通信中に消費される電力と通信速度を考慮した選択手法について提案する。提案手法を用いる事によって、こういった通信方式を用いるのが良いかを通信速度と消

第1章 序論

費電力の両方の観点から判断する事ができる。選択手法に、通信速度や通信中に端末が消費する電力から人が感じる満足度である効用値を用いる事でよりユーザーに合った通信方式を選択することができる。また、アンケートによって、いくつかの時間帯、端末の電池残量における効用関数の構築を実際に行った。さらに Android 端末を用いて、複数の実際の無線通信における消費電力、通信速度を測定し、提案手法における有効性の確認を行った。

1.2 本論文の構成

本論文は以下の6つの章から構成されている。

第1章 序論

序章として、本研究における動機、論文の構成を述べる。

第2章 研究の背景

関連研究として、異なる通信方式を利用した時の変更のトリガーについて、検討した研究を述べ、その問題点を挙げる。また、本研究の動機ともなる複数経路無線通信について紹介し、現状について述べる。

第3章 通信方式の選択手法

スマートフォンなどのモバイル端末における問題点について挙げ、通信速度と消費電力を考慮に入れた選択手法の必要性について述べる。次に、本研究で用いる多属性効用関数について解説し、さらに、効用関数に関わる要因についてのモデルについて述べる。

第4章 通信方式選択の有効性の検証

いくつかの時間帯、電池残量における通信速度と通信時の消費電力についての多属性効用関数を、アンケートを通して構築した。さらに、実際に Android 端末を用いて、通信速度、消費電力について測定し、提案手法の有効性を確認する。

第1章 序論

第5章 実環境における検討

実環境における、通信方式選択時に必要となる消費電力の推定の問題点について挙げ、それに対して、事前を取得したデータをもとに選択する学習方法を提案する。

第6章 結論

本論文のまとめと今後の課題について述べる。

第 2 章 研究の背景

本章では、研究の背景として本研究に関連する研究について述べる。また、複数経路無線通信で行われている研究について述べ、現状について言及する。

2.1 関連研究

本研究に関連する研究として、無線通信において異なる無線方式間で切り替えを行っている研究について紹介し、切り替えのトリガーとして、こういったものを用いているかについて触れながら述べる。

2.1.1 CoolSpots[3]

CoolSpots は、無線モバイル端末において、アプリケーションの変更をする事なく、Wi-Fi と Bluetooth が利用できる環境において自動で切り替えを行う事で、モバイル端末の省電力化をはかったシステムである。のみの通信に比べて50%以上の省電力化を実現している。図1に CoolSpots の概要について示す。CoolSpots は、通信していない時は、Wi-Fi の PSM(power saving mode)と Bluetooth の sniff モードを用いている。Bluetooth は、このモードを使うことで、消費電力を非常に低いレベルに抑える事ができる。

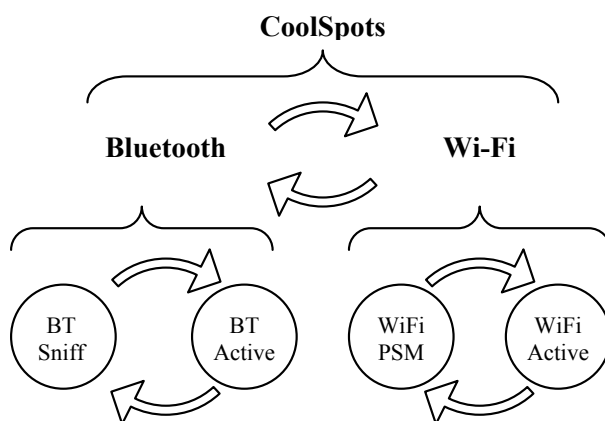


図1 CoolSpots の概要 [3]

次に、CoolSpots において用いられている、Wi-Fi と Bluetooth 間における切り替え手法について、表1に示す。250ms 毎に、利用可能な帯域を増やすために Wi-Fi に切り替える (Switch Up) か、Wi-Fi を切り、Bluetooth に切り替える (Switch Down) かを表1に基づいて、5つの手法について検証している。Bandwidth は通信帯域を

第2章 研究の背景

切り替えのトリガーとして用いており、ある通信帯域を閾値として、切り替えを行う。
cap-static では、Switch Up する際のトリガーとして、RTT(Round Trip Time)を、
Switch Down する際には通信帯域を切り替えのトリガーとして用いている。
Cap-dynamic では、cap-static 同様、Switch Up する際のトリガーとして、RTT(Round Trip Time)を用いているが、Switch Down する際には Switch Up 時の通信帯域を切り替えのトリガーとして用いている。そうすることで、必要以上に Wi-Fi で通信する事を避け、また誤った Bluetooth への切り替えを避ける事ができる。図2に以上の手法を用いたときの省電力の結果を図2に示す。transfer-1、transfer-2 は、ファイル転送時における評価であるが、切り替えによるエネルギー消費によって、単一无線インターフェース利用時より、消費電力が増えているが、その他においては省電力を実現している。

表 1 CoolSpots の切り替え手法[3]

Policy	Switch Up	Switch Down	Comments
wifi-fixed	N/A	N/A	Only uses WiFi
bandwidth	Static Bandwidth Threshold	Static bandwidth	Can fail in bad network conditions
cap-static	Capacity Detection	Static bandwidth	Same as Bandwidth policy
cap-dynamic	Capacity Detection	Use Switch-Up Bandwidth	Handles all network conditions
bluetooth-fixed	N/A	N/A	Only uses Bluetooth

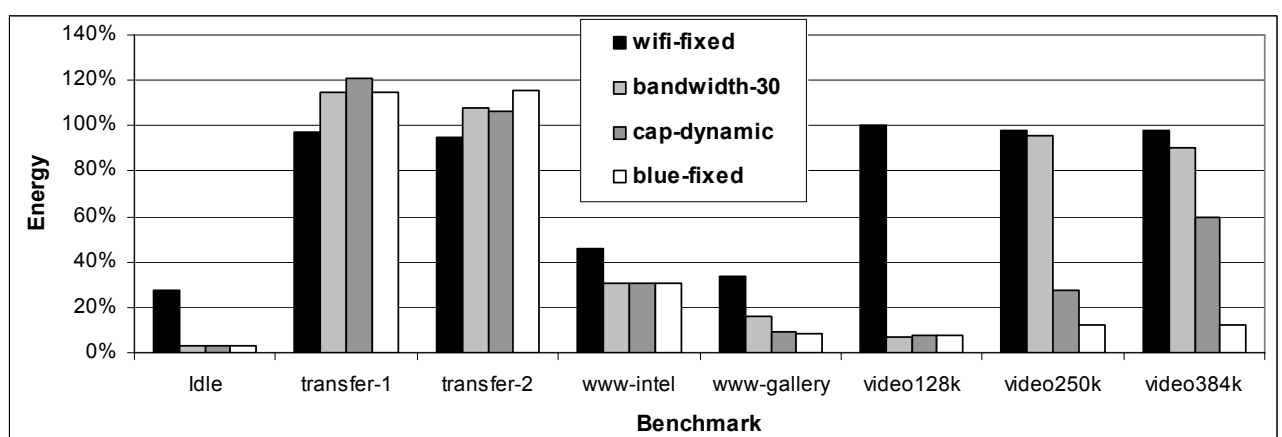


図2 切り替え手法の評価[3]

2.1.2 無線 LAN、3G 間での切り替え

現在広く普及している無線 LAN、3G 間での切り替え方について言及しながら、研究を紹介する。

[4]は、Android 端末における Wi-Fi と 3G 間でのハンドオーバー手法について述べている。3G から Wi-Fi への切り替えは、Wi-Fi が接続できれば接続する。また Wi-Fi から 3G への切り替えは、図 3 に示すように、Wi-Fi は通信中に AP(Access Point)との電波強度を測定し、AP の電波強度が閾値 α より、下回った場合に通信状態が不安定と判断し、3G へハンドオーバーする。

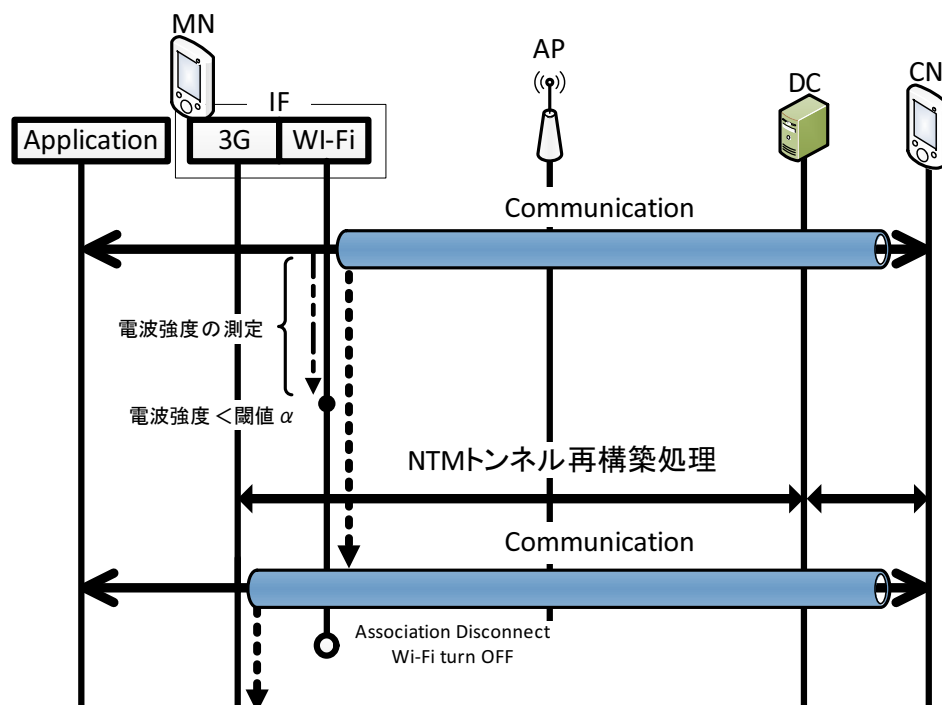


図3 Wi-Fi から 3G へのハンドオーバー[4]

MultiNets[5]は、モバイル端末において、リアルタイムに無線ネットワークインターフェースを切り替える事が可能なシステムである。MultiNets のアーキテクチャについて、図 4 に示す。MultiNets では、省電力手法、オフロード手法、Performance 手法の 3 つの切り替え手法が用いられており、それぞれ 27.4%の省電力、データトラフィックの 79.82%のオフロード、平均の 7 倍のスループットを実現している。

第2章 研究の背景

次にそれぞれの手法について、具体的に述べる。省電力手法では、通信データの流れを監視し、ある閾値 α bytes 通信すると、Wi-Fi に切り替わる。また、Wi-Fi が β 秒間アイドルモードであると、携帯回線に切り替わる。オフロード手法では、Wi-Fi が利用可能であれば、Wi-Fi に接続する。Wi-Fi 接続時に α dBm 以下に電波強度が下がると携帯回線に切り替わる。Performance 手法では、スループットを最大限に大きくする事を目的とし、利用可能なネットワークのうち、最もスループットが大きいネットワークを利用する。

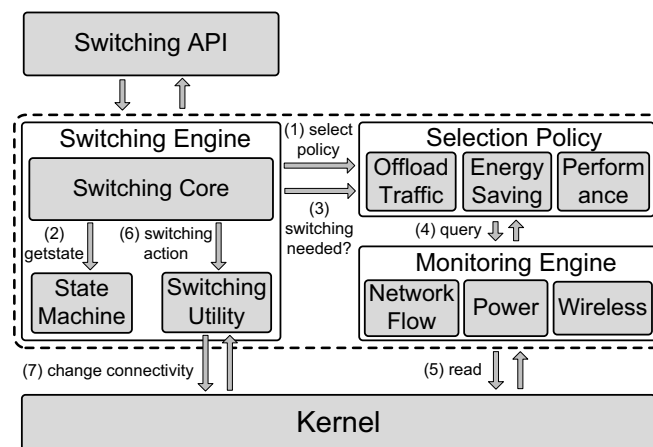


図4 MultiNets のアーキテクチャ[5]

2.1.3 無線 LAN、LTE 間での切り替え

次に近年、急速に注目されてる LTE と無線 LAN における切り替え方について言及しながら、研究を紹介する。

[6]は、LTE と無線 LAN でハンドオーバーする際の決定手法として、MCDM(multi criteria decision making)手法を用いている。図5、図6は、LTE と無線 LAN 間でハンドオーバーする際の概要を示した図である。MCDM 手法は、あらかじめコスト、通信帯域、RSSI の三つの項目に対して、評価点を1から7と振り、AHP(Analytic Hierarchy Process)法に基づいて、より良いネットワークを選び出す手法である。

提案手法を用いることで、RSSI のみを考慮に入れた手法に比べて、コスト、通信帯域、ハンドオーバーの成功確率の上昇が見られた。しかし、評価点に対する検討が不十分であり、なぜそれぞれの項目に対してその点をつけたのかについては、あまり

第2章 研究の背景

検討されていない。

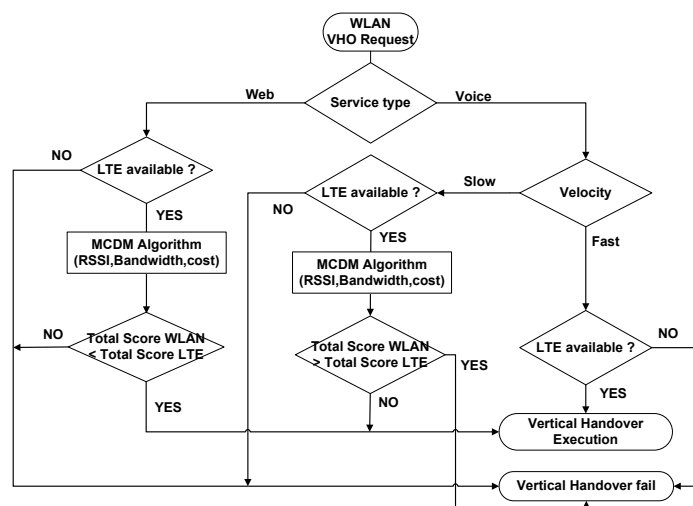


図5 LTE から無線 LAN への切り替え手法[6]

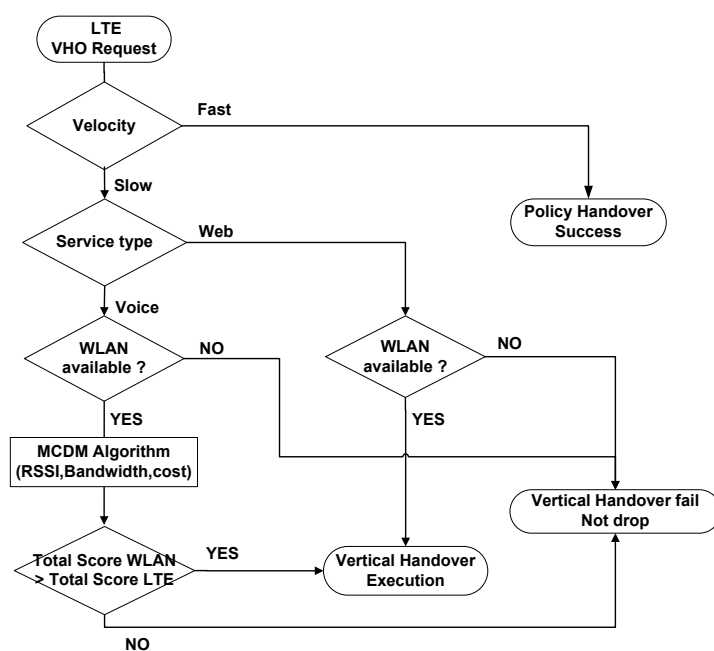


図6 無線 LAN から LTE への切り替え手法[6]

第2章 研究の背景

現状ある研究においては、端末が消費する電力や、人が感じる満足度を考慮に入れた研究は行われていない。しかし、日本経済新聞によると、スマートフォンユーザーの4分の3が電池について「非常に不満」か「やや不満」と回答している。[7] また、通信速度に対して、人が感じる満足度は非線形である事が知られている[8]。以上の事から通信経路の選択の際に、消費電力や人の満足度を考慮にいれた方法を考えていくべきである。

2.2 複数経路無線通信

本章では本研究の動機ともなる複数経路無線通信に関する研究について述べる。OSI 基本参照モデルにおけるアプリケーション層で考案された通信手法としては、ARMS[9]やPsockets[10]などがあり、トランスポート層で考案された手法としては、SBAM[11]やpTCP[12]、CMT[13]などがある。アプリケーション層で考案する利点としては、現在すでに実装されているオペレーティングシステムの変更を必要としないことが挙げられる[9]。一方で、各々の通信路に対して細かい制御が難しい。トランスポート層からアプローチする利点としては各々の通信路に対して輻輳制御等が可能で通信速度の向上がより見込まれることである。一方で、実装が難しく、実用化になかなか至らないことにある。その他にもネットワーク層における複数経路化手法も研究されている[14][15]。このように複数の無線インターフェースを用いた通信手法は様々に研究されているが、その内幾つかを紹介する。

2.2.1 ARMS[9]

ARMS(Application-level concurrent multipath utilization on reliable communication)は、アプリケーション層で実現された、モバイル端末向けの複数経路化手法である。トランスポートプロトコルとしてSCTP(Stream Control Transmission Protocol)を用いており、信頼性のある通信が可能であり、アソシエーションの最中にIPアドレスを変更する事ができる。図7にARMSのシステム図を示す。ARMSによる通信概要は以下の通りである。

1. パスの情報をアプリケーションで取得
2. その情報を基に転送比率を決定
3. 転送比率に基づいてデータを送信

SCTPでは、冗長化を目的として2つの経路の内の片方を主に通信で使い、もう一つの経路をデータ転送できなかった時にのみ用いているが、ARMSでは、2つの経路を同時

第2章 研究の背景

に利用し高速な通信を実現している。また、ARMS では、異なるアソシエーションを作成し、それぞれの帯域幅を同時に計測しすることで、転送比率を決定している。具体的には、それぞれのアソシエーション毎にシングルパスの転送を行い、片方の経路には、実データを、もう片方の経路にはダミーデータを送り、帯域を計測している。ダミーデータの転送を行う経路の帯域の計測が終了すると、マルチパス転送に移行する。

ARMS の評価では、シングルパスの転送と比較して最大で 1.97 倍の転送速度が実現できたと報告している。

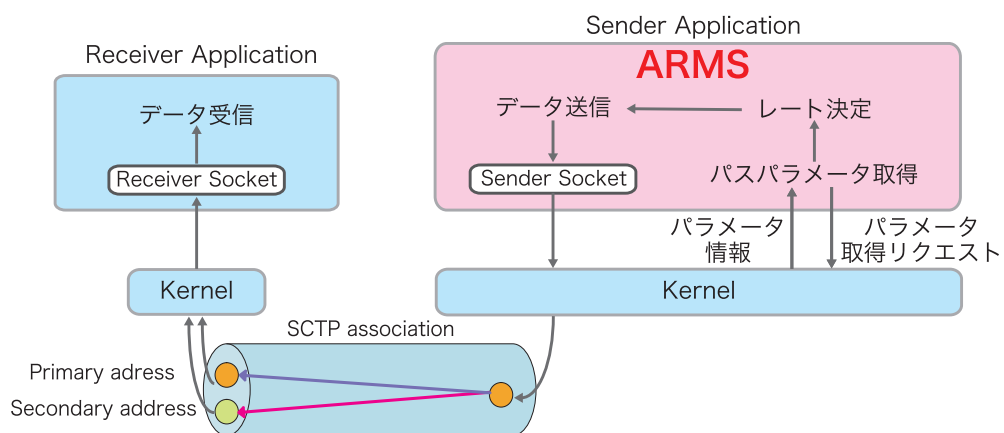


図 7 ARMS の概観[9]

2.2.2 pTCP[12]

pTCP(parallel TCP)は、トランスポート層で実現された通信手法であり、トランスポート層内の機能・状態を分割し、複数化することによって複数の異種無線インターフェースを活用することを可能にした手法である。ネットワークを変更する場合に途切れずにハンドオーバーができ、また状態の違う複数のパスに対してそれぞれに合わせた動的な輻輳制御が可能である。pTCP の特徴としては、通信中にコネクションの動的な追加や削除ができること、ソケットとコネクションで機能を分けていることが挙げられている。

図 8 に pTCP の概要を示す。アプリケーションが pTCP ソケットを生成すると pTCP では、TCP-v(TCP-virtual)と呼ばれるコネクションを複数生成する。TCP-v の数は、アクティブなネットワークインターフェースの数で決まる。TCP-v には、輻輳ウィン

第2章 研究の背景

ドウサイズや ACK・シーケンス番号等など、つまりデータ以外の TCP ヘッダーが格納されており、また各々のコネクションでの輻輳制御が行われている。それぞれのコネクションにどれだけのデータを送るかは、輻輳ウィンドウサイズによって判断されている。それぞれのコネクション毎の輻輳ウィンドウサイズで動的に制御することで、より細かく、経路の状態の取得が可能となる。

pTCP を用いる事で、ネットワークを変更する際に途切れずにハンドオーバーが可能になり、また異なる品質の通信を複数用いた時にそれぞれに合わせた動的な輻輳制御を行いより効果的な通信を可能にしている。シミュレーションによる評価において、2つのパスの異なるスループットを足し合わせたものにかかなり近い結果が得られたと述べられている。

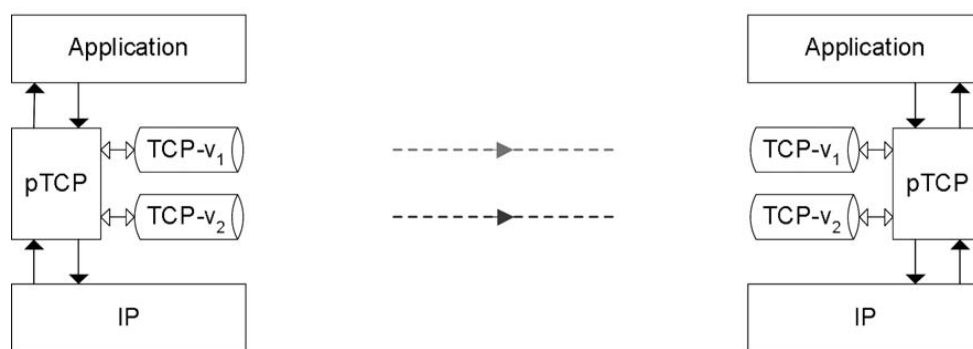


図8 pTCP の概観[12]

2.2.3 ミドルウェア[16]

アプリケーション層やトランスポート層以外のミドルウェアと呼ばれる層で複数通信を実現している研究もある[10]。ミドルウェアとは、トランスポート層とアプリケーション層の間に独自に構築した層で、ミドルウェアで新しく帯域を集約している。提案手法について示したものが図9となる。ミドルウェアとの比較として、ネットワーク層における帯域集約する手法について論じている。図9の左はネットワーク層における帯域集約について示した図である。

ネットワーク層における帯域集約の問題点は、TCP は複数経路をひらいている中の

第2章 研究の背景

どの経路でパケットロスがおこっているか認識できずに輻輳制御を行ってしまうことである。一方ミドルウェアでは、ミドルウェア層で経路ごとに独立した TCP のコネクションを統合し、帯域を集約している。そのことにより、アプリケーション層では、ミドルウェアでの帯域集約を意識することなく通信することができる。また、ミドルウェアで、経路の複数化をはかるので、経路ごとに輻輳制御や再転送の制御を行うことができる。

シミュレーション評価において、経路ごとの通信によるスループットを束ねた値と同程度の性能を発揮することができたと述べている。今後の課題として、通信経路の帯域の比に応じて受信側のバッファのキューを用意することなどが挙げられていた。

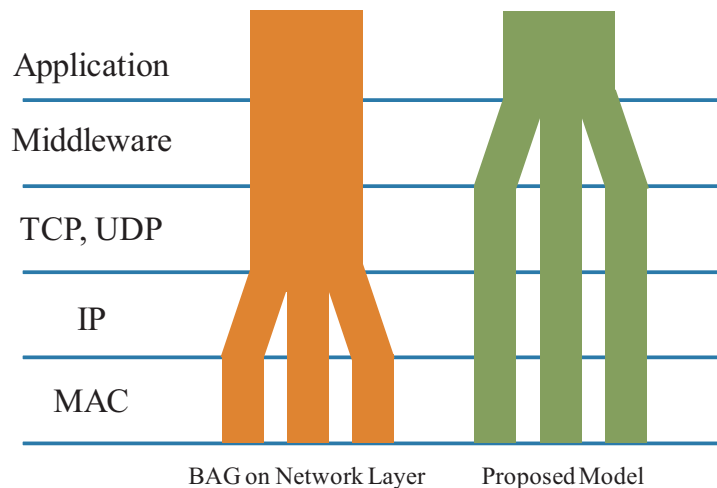


図9 ミドルウェアとネットワーク層での帯域集約との比較[16]

以上のように複数経路無線通信について、様々な研究がなされているが、現在利用されている単一无線インターフェースとの消費電力等を含めた比較等はなされておらず、前述の[7]にあるような問題からも検討していく必要がある。本研究では、通信速度と消費電力の両方を考慮に入れた通信方式選択手法を提案することで、複数経路無線通信の発展に貢献する。また、本研究では、無線通信利用時に経路毎の通信速度と消費電力の取得が必要となるため、ARMSでの帯域測定で用いられていたような経路ごとに一度通信をつなぐような手法も取り入れていく必要があるだろう。

第 3 章 通信方式の選択手法

本章では、効用関数に基づいた無線通信方式の選択手法について、通信方式選択の行動モデルとともに提案する。また、本研究で用いる多属性効用関数法について、その他の手法や、単一の効用関数と合わせて述べる。

3.1 効用関数

人はサービスを受けたり、物を消費する事によって、喜びを感じ、満足感が得られる。その満足感はサービスが充実している程大きくなると言える。しかし、その満足度はサービスに対して常に線形であるとは限らず、非線形である事が多い。効用関数とは、そういった人が感じる主観的な満足度や幸福感といった感覚的なものを定量的に表す関数である。

効用関数の求め方を以下に記述する。効用関数を求めるにはまず、MOS (Mean Opinion Score) を求める、MOS とは、あるサービスに対する効用の平均値である。一般的には、すばらしい、良い、普通、悪い、非常に悪いなどといった5段階評価を用いる[17]。それぞれの評価に対する効用値を割り当て、(1)式でMOSを求める。

$$MOS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i \quad (1)$$

n は被験者数、 a_i はある被験者 i の効用値である。このMOSを、アンケートなどを通して求め、あるサービスの品質に対してプロットし、最小二乗法を用いることで、効用関数である近似式を得る事ができる[18]。

携帯電話サービスにおいて、効用関数を用いた研究は幾つかされており、[18]では、携帯電話のコンテンツのダウンロード時の、ダウンロードするコンテンツの種類とサービス利用料金、ダウンロードにかかる時間に対するユーザーの効用を求め、その効用関数から、より公平な無線リソースマネジメントを行った研究である。それぞれの効用を求める実験では、携帯電話を模した画面を用いている。被験者はダウンロードの条件を確認した後、ダウンロードボタンをクリックすると、コンテンツがダウンロードされ、数秒後にダウンロードが完了する。被験者はその試行に対して、効用値をスライド式の評価方法で答える。実験では、被験者はダウンロードするコンテンツの品質の考慮は行っていない。

図10はサービス利用料金とダウンロードするコンテンツの種類毎の効用関数の結果である。図10から見て取れるように、サービス利用料金が安い方が効用値は高

第3章 多属性効用関数

く、またコンテンツの種類毎によっても明らかな差異が見られる。また、各ダウンロードに対する効用関数は非線形であり、対数関数として近似される。そのため、2つの異なる通信速度を持つ通信方式を比較したとき、その時にユーザーの感じる満足度の比は通信速度に比例しない。以上のことから、通信経路を選ぶ際に単に通信速度を用いるのではなく、人の満足度である効用値を用いる必要があると言える。

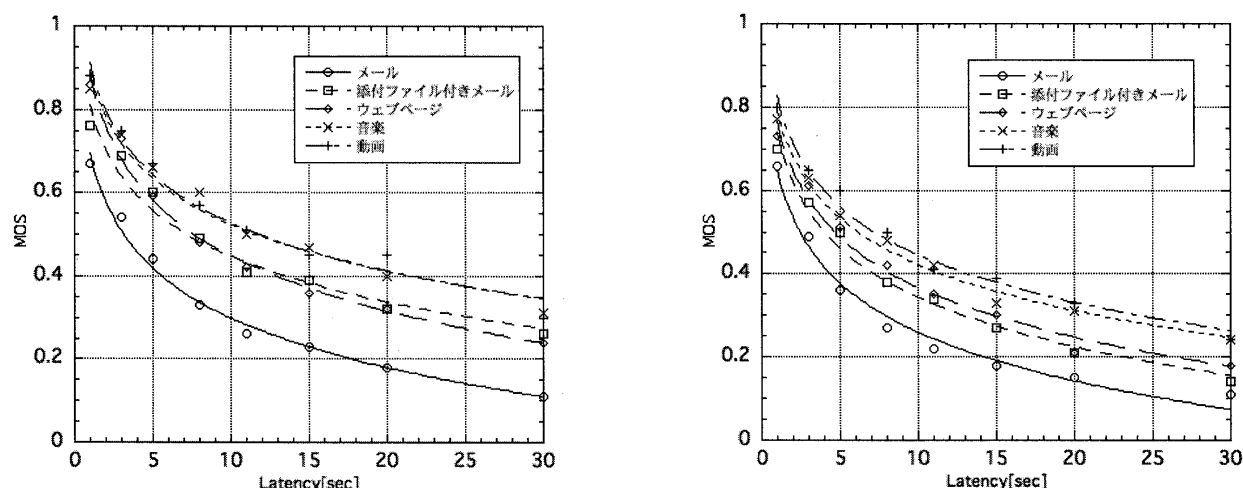


図10 料金4千円(左図)と7千円(右図)でのMOS値と待ち時間の関係[18]

3.2 モバイル端末におけるバッテリーの問題

第2.2節において複数経路を用いた通信手法について述べたが、複数経路を用いた通信をする事によって、モバイル端末の消費電力がこれまでより増えるという問題点が考えられる。この事は、モバイル端末のようなバッテリー内蔵型の通信機器にとっては、憂慮すべき問題と考えられる。前述のようにスマートフォンユーザーの多くは、バッテリーについて不満を持っている。図11はMMD研究所がバッテリーに関する満足度調査についてアンケートを行った結果である。

● バッテリーに関する満足度調査

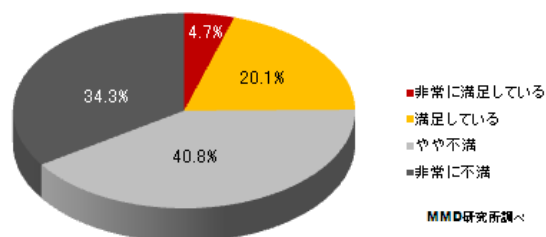


図1-1 バッテリーに関する満足度調査[19]

また、技術的にも消費電力については、常に課題として取り組んでいかなければならない。図1-2はディスク容量、CPU速度、RAM、無線通信速度、バッテリーのエネルギー密度の5分野におけるモバイル技術について示した図である。CPUの速度は、コンピュータ製造業における1つの指標であるムーアの法則に従い、指数関数的に大きく発展している。一方で、バッテリーに関する発展であるエネルギー密度は、13年間で、2倍程度にしか発展していない。つまり、今後の電池についての革新的な発明がない限り、常に、バッテリーについての問題は取り上げられてくると考えられる。

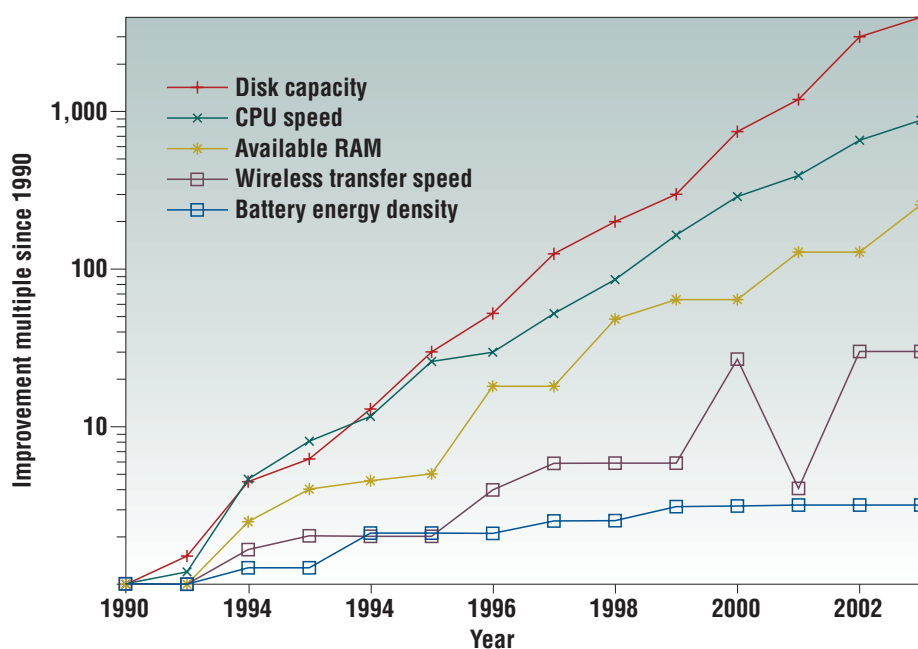


図1-2 モバイル技術の発展[20]

以上のように、スマートフォンユーザーユーザーの満足度や技術的な視点からも消費電力は大きな問題となっている。そのため、現在の無線通信環境において、単に通信速度などの QoS (Quality of Service) を追い求める事だけでユーザーのニーズを満たしていけるとは言えない[21]。そこで、本研究では、通信経路の選択の際に消費電力を考慮に入れた方法について提案する。また、[18]の研究結果から分かるように、通信速度に対する人の満足度は非線形であるため、より人が満足できる通信を選択するため、効用手法に基づいた選択手法について提案する。

3.3 多目的意思決定法

本研究では、通信速度と消費電力という2つの項目に着目するため、単にそれぞれの効用関数を得るだけでは、求める事はできない。通信速度の満足度と消費電力の満足度が一致するとは限らないためである。そこで、複数の評価すべき項目から、最も良いとされる案を導き出す多目的意思決定法を用いる。図1-3に多目的意思決定法の概略を示す。多目的意思決定法は、様々な問題が絡み合う複雑な問題から一つの案を導き出す手法であり、多くの場面で用いられている[22][23]。問題に対する意思決定者は、様々な評価すべき特質を考慮して、代替案を導き出す。多目的意思決定法の手法は様々であるが、本節では、その中の階層化意思決定法と多属性効用関数法について述べる。

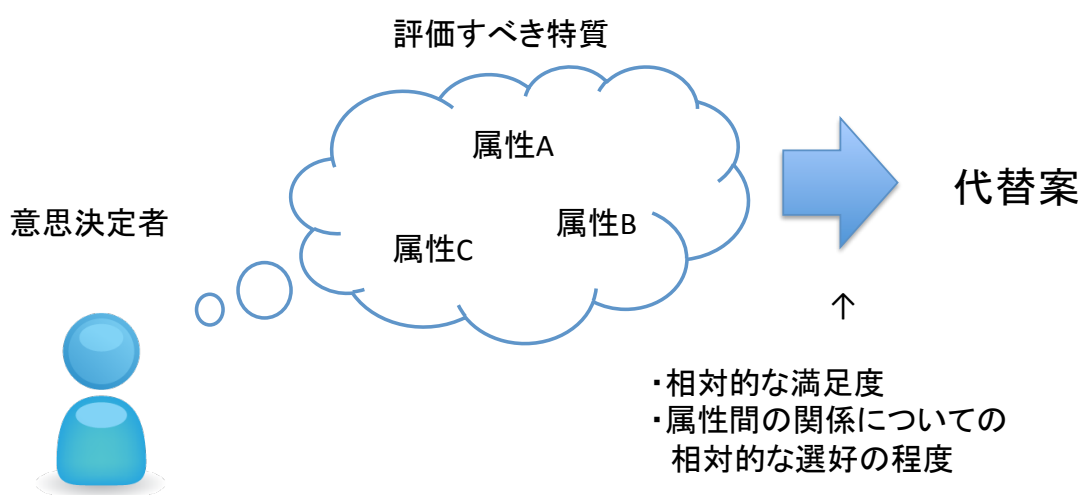


図1-3 多目的意思決定法

3.3.1 階層化意思決定法

階層化意思決定法は、Thomas L. Saaty が考案した手法であり、案を導きだすまでに関わってくる要素を階層化し、それぞれの要素に対して一対比較行列を生成することで、解決案を導きだす[24]。無線 LAN と LTE 間でのハンドオーバーをする際のトリガーとして、階層化意思決定法を用いている研究もある[6]。

階層化意思決定法は以下のような手順から成る。

1. 評価する問題の階層化
2. 各レベルの要素について一対比較を行い、相対的優先度を求める。
3. 妥当かどうかの整合性評価

代替案を目指すにあたって、どのような要素を評価しているのかを階層化することによって、問題を単純化し、比較的評価しやすい形に持ち込む事ができる。図14は、階層化意思決定法により階層化した例である。階層図は上に問題を据え、下に評価基準を並べる。必要であれば、評価基準をさらに分割する事もある。

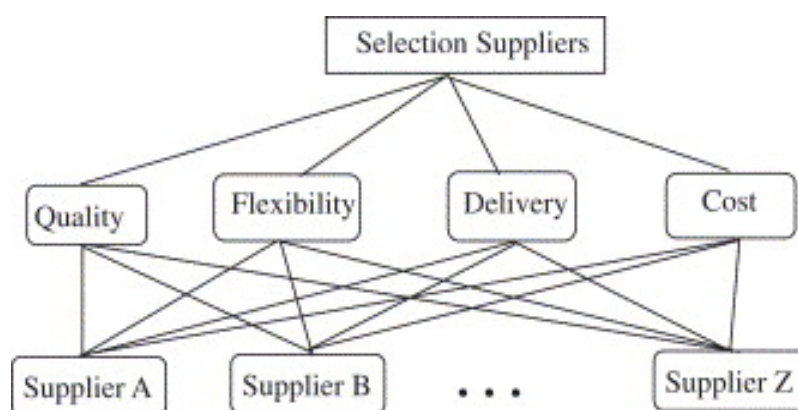


図14 階層化意思決定法の階層図[25]

手順の2における一対比較とは2つの項目を程度によって比較することであり、その比較は、絶対的に重要であれば9、非常に重要であれば7、かなり重要であれば5、若干重要であれば3、同程度の重要さであれば1、といったように重要度を割り当てる。それぞれの重要度を全ての項目に対して求める。次に要素の一対比較行列を表2

の様に生成する。

表2 一対比較行列

評価する要素	要素1	要素2	要素3
要素1	1	a_{12}	a_{13}
要素2	a_{21}	1	a_{23}
要素3	a_{31}	a_{32}	1

a_{ij} は一対比較値であり、要素 i の重要度を要素 j の重要度で割ることで求める事が出来る。

また、 a_{ij} は(2)式のような性質を持つ。

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}} \quad (2)$$

次にそれぞれの列の和を計算し、列の和で項目の一対比較値を割ることで、項目毎の重要度の割合を求める。最下層の重要度は、上位に要素の重要度を順に掛け合わせたものとなる。最後に複数の案同士を最下層の要素毎に比較し、その値と各要素の重要度を掛け合わせた和が総合的な優先度となり、値がより大きい方をより良い案とし、採用する。各要素の重要度を分析する事で、どういった要素がより深く重要視されているのか分かる事ができる。

また、一対比較がおかしい判断になっていないかを検討する必要がある。評価方法として、整合性指標 CI を用いる。 CI は式(3)によって求まる。

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

λ_{max} は表2の一対比較行列の固有値の最大値である。 n は、要素の数である。行列が完全な整合性を持つ時 CI は0となり、 CI が0.1より大きい場合は整合性が低いと考えられ、一対比較値を再検討する必要がある。

3.3.2 多属性効用関数法

多属性効用関数(MUF : Multi-attribute Utility Function)とは、要素ごとに効用関数を求め、それを合成することで得られる関数である。合成方法は Keeney の定理 [26]に基づいて、合成される。

それぞれの要素*i*に対して構成された全体の多属性効用関数を $U(x_1, x_2, \dots, x_i)$ とした時、 $U(x_1, x_2, \dots, x_i)$ を最大とする要素*i*を算出することで、より人の満足する案を見いだす事ができる。

Keeney の定理では、属性それぞれが選好独立であり、効用独立である時、

$\sum_{i=1}^n k_i = 1$ ならば、

$$U(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n k_i U_i(x_i) \quad (4)$$

$\sum_{i=1}^n k_i \neq 1$ ならば、

$$U(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{1}{K} \left[\prod_{i=1}^n \{1 + K k_i U_i(x_i)\} - 1 \right] \quad (5)$$

と表される。

n は評価すべき要素の数、 $U_i(x_i)$ は、要素*i*における単一効用関数である。 k_i は要素*i*のスケール定数である。

また(5)式における K は、

$$1 + K = \prod_{i=1}^n (1 + K k_i) \quad (6)$$

を満たす K である。

選好独立とは、属性*j*が変化した時に、属性*i*の選好関係が同一であることである。また、効用独立とは、ある属性のくじに対する条件付き選好が他の属性に依存しないことである。条件付き選好とは、ある属性*i*の効用に対して、条件として属性*j*を同時に考えた時の選好である。

k_i の推定方法は以下に示す通りである。

① k_i の推定

確実な出来事 $(x_1^w, x_2^w, \dots, x_{i-1}^w, x_i^b, x_{i+1}^w, \dots, x_n^w)$ と確率 P で (x_1^b, \dots, x_n^b) 、確率 $(1-P)$ で (x_1^w, \dots, x_n^w) が

起こる出来事が無差別に感じる P を求める。

x_i^b はある要素 i における最良の結果であり、 x_i^w は、ある要素 i における最悪の結果である。

この時、 $k_i = P$ となる。

② 2つのスケール定数 k_s 、 k_p の比の推定

(x_s^b, x_p^w) である出来事と (x_s^w, x_p^*) である出来事が無差別に感じる x_p^* を求める。

この時、 $k_s = k_p \times U_p(x_p^*)$ となる。

②の結果に①を代入することにより、それぞれの要素のスケール定数が求まり、求まったスケール定数から、(6)式より K が求まる。

以上の方法によって、多属性効用関数は求まる。

階層化意思決定法は、絶対的に重要であれば9、非常に重要であれば7などのように人の感覚を数字で表しているが、その数字の表現は、曖昧であり、また案同士の比較において、[18]で挙げられている通信速度と人の満足度における非線形性であることを無視してしまうことになる。よって、本研究では、通信方式の選択手法として、多属性効用関数を用いる。

3.4 通信方式の選択モデル

通信方式の選択を行うにあたり、その選択の階層化モデルを構築する必要がある。本研究での階層化モデルを図15に示す。最上層に目標である「通信方式の選択」を、次に、評価基準である「得られる通信速度」と「通信中に消費される電力」を置く。最下層には、代替案である、「通信方式A」による通信、「通信方式B」による通信、「通信方式C」による通信を置く。ユーザーは、事前に測定したそれぞれの通信方式の状態（通信速度、消費電力）から最も満足と感じられる（効用が高い）通信方式の選択を行う。

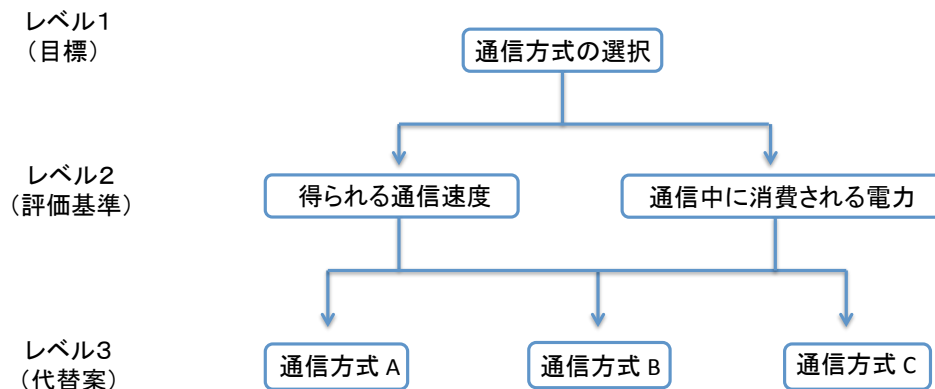


図 1 5 通信方式選択の階層化モデル

また、階層化モデルにおける、レベル2の通信速度や消費電力に対する効用は、様々な要因によって決まると考えられる。[27]では、個人または会社組織が複数のサービスから1つのサービスを選択する際の選択行動モデルの構築を行っている。モデルの構成は4つの構成要素から定義されている。

1. 意思決定者

個人や会社といった、実際にサービスを利用するユーザー。

2. 意思決定要因

意思決定者がサービスを選択する際に関わってくる要因のことであり、以下の3つに分類される

① ユーザー属性

意思決定者の年齢や職業等の個人が持つ情報

② 手段属性

サービスの持つ属性機能の充実具合や、料金、所要時間やサービスのデザイン性など

③ 環境属性

サービス利用の目的や利用環境など。緊急性や他の手段による代替可能性、天候など個々の具体的な要因うい特徴づける共通の要素を説明変数として、取り込む。

3. 選択肢

意思決定者が選択可能なサービスの集合。意思決定者は選択肢の中から、自分が良い、必要と思うサービスを選択する。

4. 行動決定則

行動決定則とは、様々にあるサービスの選択肢から、最も満足度（効用）の高いサービスを選択するという、行動原理である。意思決定者であるユーザーは行動決定則に従いサービスの選択を行う。

本研究では、[27]で考案されたモデルに対して、通信方式の選択に特有な要因を取り込み、意思決定要因に関するモデルを新たに構築した。通信方式選択の意思決定要因のモデルについて、図16に示す。意思決定の属性モデルは以下の3つの属性で構成されている。

① ユーザー属性

意思決定者の年齢や職業等の個人が持つ情報。特に若い人や急を要する仕事が多いユーザーは通信速度を求める傾向が強いと想定される。

② ユーザー依存の環境属性

ユーザーの行動等に依存した属性であり、端末からは決定的に定めることができない属性。ユーザー毎のスケジュールや緊急性、端末を充電可能なエリアまで移動するのにかかる距離、時間などが挙げられる。スケジュールによって、今日1日の行動が決められ、どのようなタイミングで端末に対して充電され、こういった配分で電力を消費するのが良いのかが決まる。また、ユーザーが緊急的に急いで通信したい場合は、通信速度に対する効用値が下がり、消費電力に対する効用値が上がるなどといった状況が想定される。

③ 非ユーザー依存の環境属性

ユーザー自身の行動によって決まらない属性であり、端末から決定的に定めることができる属性。端末で利用されているアプリケーションや、時間帯、モバイル端末のバッテリーの残量、充電中かあるいはそうでないかなどの情報が挙げられる。バッテリーの残量などによって、より電力を消費していいのか、あるいは抑えたいのかなど、

ユーザーの満足度は変わってくると考えられる。

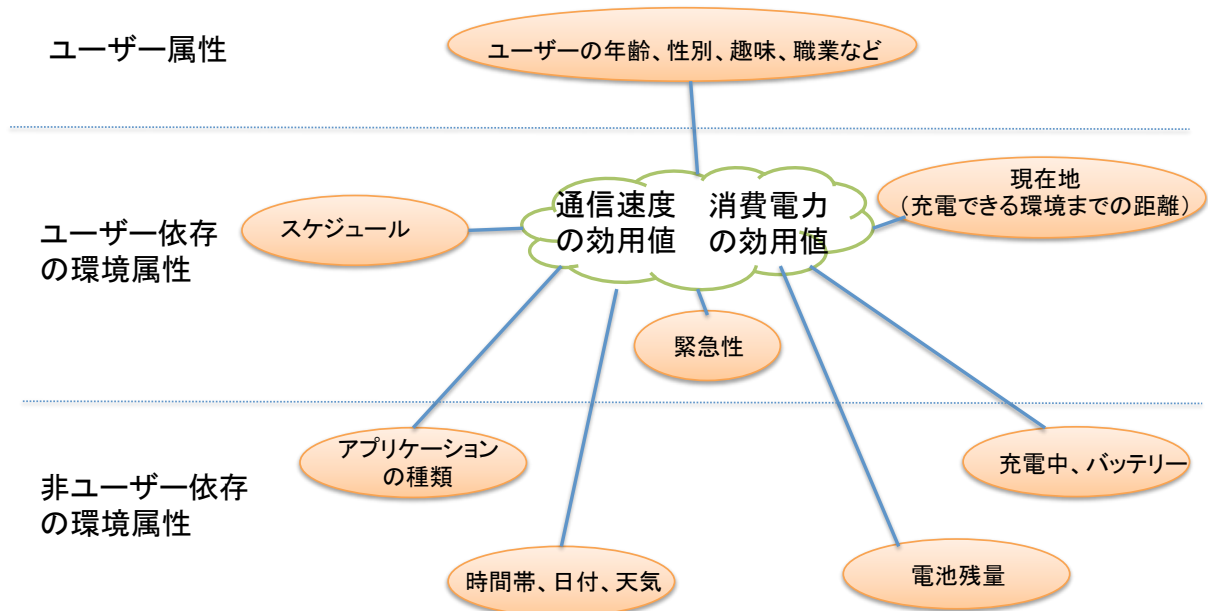


図 1-6 通信方式選択の意思決定の属性モデル

以上まで、通信方式の評価基準として、通信速度と消費電力をあげ、さらにその基準に影響を与える属性のモデルについて述べた。ユーザーは行動決定則に基づき、式(7)における効用関数から最も効用の大きい通信方式の選択をする。

$$\begin{aligned}
 U(d, e, \alpha_d, \beta_d, \dots, \alpha_e, \beta_e, \dots) \\
 = K_d(\alpha_d, \beta_d, \dots) U_d(d, \alpha_d, \beta_d, \dots) + K_e(\alpha_e, \beta_e, \dots) U_e(e, \alpha_e, \beta_e, \dots) \\
 + (1 - K_d(\alpha_d, \beta_d, \dots) - K_e(\alpha_e, \beta_e, \dots)) U_d(d, \alpha_d, \beta_d, \dots) U_e(e, \alpha_e, \beta_e, \dots) \quad (7)
 \end{aligned}$$

式(13)において、 d は通信速度、 e は通信時の消費電力、 $\alpha_d, \beta_d, \dots, \alpha_e, \beta_e, \dots$ は通信速度、通信時の消費電力の効用に影響を与える要因、 $U(d, e, \alpha_d, \beta_d, \dots, \alpha_e, \beta_e, \dots)$ は様々な要因を含んだ通信速度と通信時の消費電力に対する多属性効用関数、 $U_d(d, \alpha_d, \beta_d, \dots)$ 、 $U_e(e, \alpha_e, \beta_e, \dots)$ はそれぞれの要因を含んだ通信速度、通信時の消費電力に対する単一効用関数、 $K_d(\alpha_d, \beta_d, \dots)$ 、 $K_e(\alpha_e, \beta_e, \dots)$ は、それぞれ通信速度、消費電力に対するスケール定数である。

第 4 章

通信方式選択の有効性の検証

第4章 通信方式選択の有効性の検証

本章では、必要なアンケートの量やシステムから第3章で構築した通信方式選択モデルのうち非ユーザー依存の環境属性の幾つかについて考えた時の、通信方式選択に関する多属性効用関数を求めた。ユーザー属性やユーザー依存の環境属性を考慮に入れることで、よりユーザーの満足できる効用関数が構築できることが期待される。このことは今後の課題である。さらに、Android 端末での通信における無線 LAN、LTE、HSDPA について通信速度、消費電力を実際に測定し、求めた効用関数について評価を行い、提案手法の有効性の確認をした。

本研究では、アプリケーションとして Web ブラウザの利用を想定し、3つの時間帯（朝8時、昼12時、夜18時）、5つの電池残量の状態（100%、80%、60%、40%、20%）に対する効用関数の構築を試みた。[18]に見られるように、アプリケーションの種類によって求める効用は変わってくるため、その他のアプリケーションに対してもアプローチすることで違う効用関数が得られることが考えられる。

通信方式の選択についての多属性効用関数を求めるにあたり、まずは、単一効用関数である通信速度、通信時の消費電力の関数をアンケートにより求め、次に多属性効用関数の算出についてのアンケートを行った。アンケートは大学生16人に対して実施した。

4.1 通信速度の効用関数

満足度に対する効用を測定する上で、アンケート内容は答案者にとって直感的に分かりやすい事は重要である。そのため、シミュレータ上に構築したスマートフォンの画面をクリックし、数秒後にある Web ページがダウンロードされた時、どの程度満足できるかを被験者は回答する。

アンケートでは、答案者は参照データと評価データを交互にスマートフォンの画面でクリックする。この手法は、他の通信品質の評価実験で用いられている手法である[18]。参照データはクリックすると、すぐに Web ページが表示される。評価データはクリックの後にダウンロード中の画面が表示され、数秒後に Web ページ(285445Bytes)が表示される。Web ページとしては[28]を用いた。

被験者は評価データをクリックしてから、表示されるまでにかかった時間に対する満足度を「とても速く感じる」「速く感じる」「普通」「速く感じる」「とても遅く感じる」の5段階評価が等間隔に配置された縦の棒線に対して横棒で記入する。アンケートに用いた評価用紙は図17である。「とても速く感じる」ときを効用値として1を、「とても遅く感じる」ときを効用値として0を割り当てている。

第4章 通信方式選択の有効性の検証

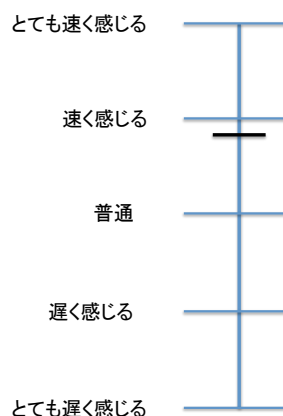


図17 評価用紙（通信速度）

図18は実際に利用したスマートフォンの画面である。ラップトップパソコン上でXcodeを用いて実装し、iOSシミュレータを用いて表示している。

評価実験では、1秒～13秒の中で、ランダムな時間をかけて表示される。表示までにかかる時間は、答案者に対して通知せずに実験を行っている。



図18 アンケートの表示画面

第4章 通信方式選択の有効性の検証

アンケートを行って得られた結果が図19である。青い点はダウンロードにかかった時間それぞれに対する被験者の効用値の平均、つまり MOS 値である。また、橙色の線は最小二乗法によって得られた関数である。

図19において、画像のダウンロード時間に対する MOS 値は指数関数的に減少している。そこで、効用関数として、式(8)を推定する。

$$U = A e^{-Bx} \quad (8)$$

U が画像のダウンロード時間に対する効用値、 x が画像のダウンロード時間である。最小二乗法を用いて近似した結果が式(9)である。

$$U = 1.03 e^{-0.18x} \quad (9)$$

式の寄与率は 0.96 であり、推定関数として十分当てはまっていると言える。

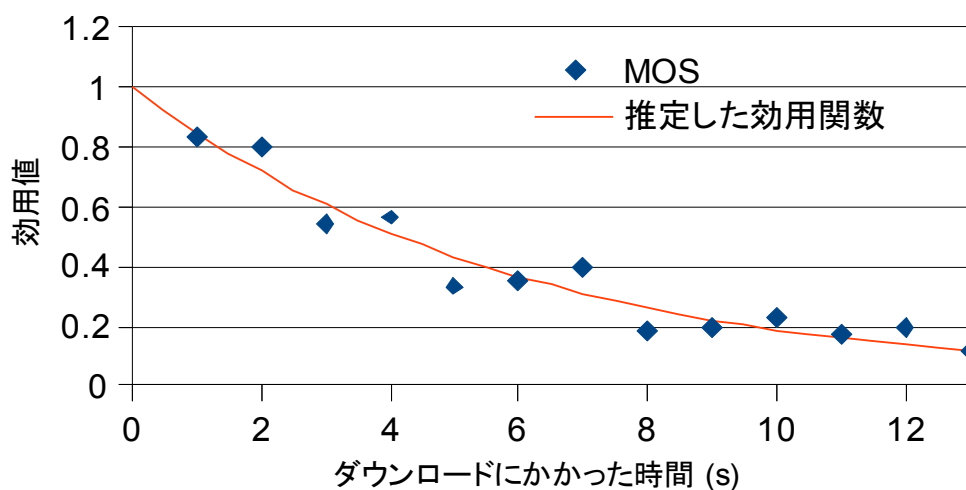


図19 ダウンロード時間に対する効用関数

また、図20は式(9)を通信速度として表した時の図である。通信速度に対する評価実験は、実際には、ダウンロードして表示するまでの待ち時間に対する満足度である。しかし、Web ブラウザなどでは、通信しながら、表示も同時に行っているものも多く、通信が終わったのとほぼ同時に表示される。そのため、本研究では、待ち時間と通信時間は同一であるとし、通信速度は式(10)のように表される。

$$bps = \frac{D}{t} \quad (10)$$

bps は通信速度、 D はダウンロード対象のコンテンツの大きさ、 t はダウンロードにかかった時間である。式(10)を式(9)に代入することで、通信速度に対する満足度を求め

る。

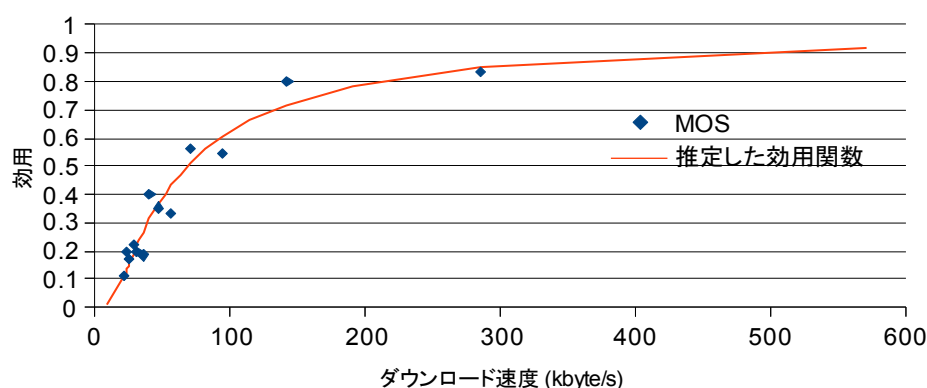


図 2 0 通信速度に対する効用関数

4.2 消費電力の効用関数

通信速度同様に、満足度に対する効用を測定する上で、アンケート内容は答案者にとって直感的に分かりやすい事は重要である。そこで、被験者は実際にスマートフォン(Android 端末 galaxy s2 LTE SC-03D)を用いて、無線 LAN 環境下において、10 分間、Web ブラウジングを行う。被験者は、Web ブラウジングの後、3つの時間帯（朝 8 時、昼 12 時、夜 18 時）、5つの電池残量の状態（100%、80%、60%、40%、20%）における電池の減り（1%～10%の間を1%刻み）に対する満足度を、通信速度については考慮せずに答える。満足度は、通信速度の効用値を求めるアンケート同様に「十分に満足できる」「満足」「普通」「不満」「とても不満に感じる」の5段階評価が等間隔に配置された縦の棒線に対して横棒で記入する。アンケートに用いた評価用紙は図 2 1 である。

実験から得られた結果を図 2 2、2 3、2 4、2 5に示す。図 2 2は朝 8 時、電池残量 100%条件時の消費電力に対する効用関数である。青い点は電池の減りそれぞれに対する被験者の MOS 値である。また、橙色の線は最小二乗法によって得られた関数である。

図 2 2において、電池の減りに対する MOS 値ははじめ、減少量が少しずつ大きくなっているが、効用値が 0.5 付近で、逆に減少量が少しずつ小さくなり、次第に効用値 0 に漸近していく。そこで、効用関数として、式(11)を推定する。

$$U = A \arctan\{B(x - C)\} + 0.5 \quad (11)$$

U が電池の減りに対する効用値、 x が電池の減りである。

第4章 通信方式選択の有効性の検証

最小二乗法を用いて推定した結果が式(12)である。

$$U = 0.80 \arctan\{-0.094(x - 9.0)\} + 0.5 \quad (12)$$

式の寄与率は0.996であり、十分当てはまっているといえる。

図2-3、2-4、2-5はそれぞれの条件時において、上記同様に推定した関数の結果である。

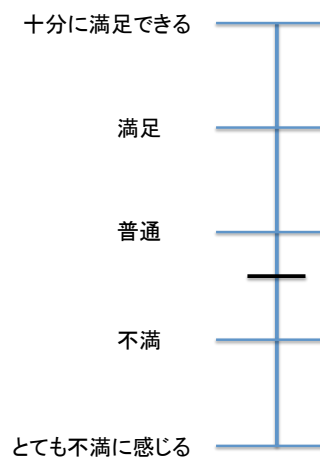


図2-1 評価用紙（消費電力）

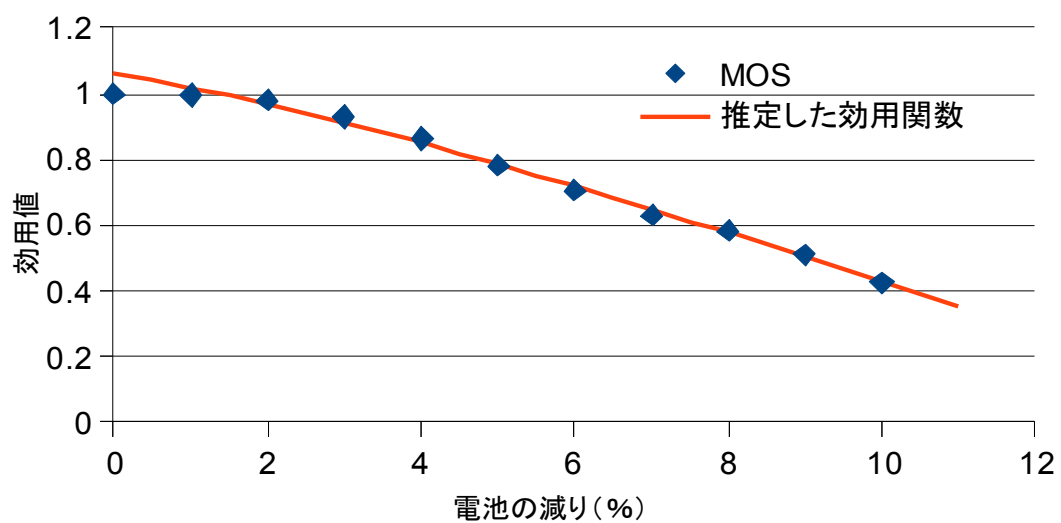


図2-2 朝8時、電池残量100%時の消費電力に対する効用関数

第4章 通信方式選択の有効性の検証

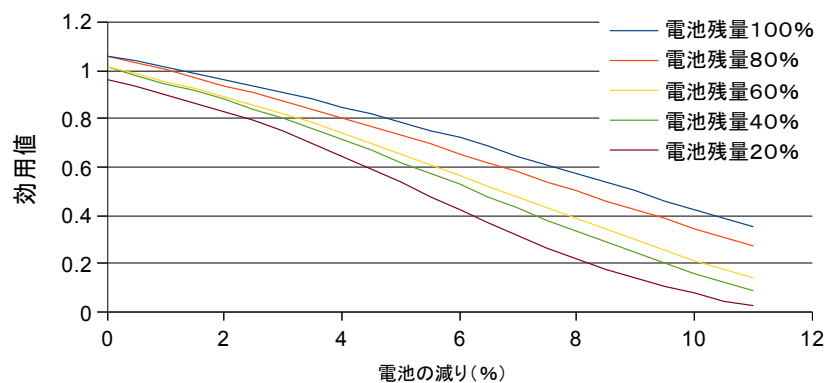


図2.3 朝8時における効用関数

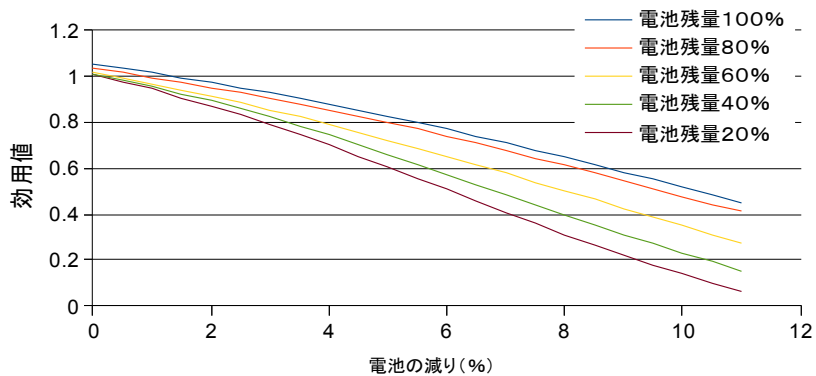


図2.4 昼12時における効用関数

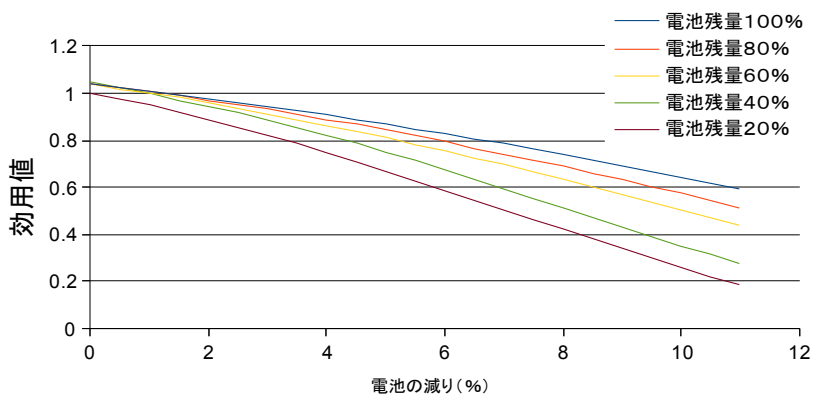


図2.5 夜18時における効用関数

第4章 通信方式選択の有効性の検証

表3 推定された関数の係数

	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
朝8時、電池残量100%	0.80	-0.094	9.0
朝8時、電池残量80%	1.04	-0.074	8.0
朝8時、電池残量60%	0.74	-0.12	6.7
朝8時、電池残量40%	0.74	-0.13	6.3
朝8時、電池残量20%	0.55	-0.21	5.3
昼12時、電池残量100%	0.74	-0.090	10.3
昼12時、電池残量80%	0.74	-0.091	9.7
昼12時、電池残量60%	0.74	-0.10	8.0
昼12時、電池残量40%	0.74	-0.12	6.85
昼12時、電池残量20%	0.74	-0.13	6.1
夜18時、電池残量100%	0.74	-0.070	12.8
夜18時、電池残量80%	0.74	-0.080	11.3
夜18時、電池残量60%	0.74	-0.088	10.1
夜18時、電池残量40%	0.74	-0.11	8.2
夜18時、電池残量20%	0.74	-0.11	7.1

表3は推定された関数の係数を表しており、係数は式(11)に基づく。それぞれの効用関数の寄与率はいずれも0.98以上であり、十分に近似されていると言える。

図22、23、24から見て取れるように、電池残量が多い程、また、時間が遅くなる程電池の減りに対しては寛容になる傾向にある。これは、電池が多い時は、多小は電池が減少しても大丈夫と感じ、また、時間が遅い程モバイル端末が充電できる時が多いためと考えられる。

また、通信経路の選択において、通信時の消費電力に対する効用関数を求める必要がある。そこで、通信時の消費電力は式(13)のように求められる。

$$V_t = V_{total} \times \frac{X_t \times k_i}{X_t \times k_i + X_{n-t}} \times \frac{1}{X_t} \quad (13)$$

V_t は通信時の単位時間当たりの消費電力、 V_{total} は総消費電力、 X_t は通信時間、 X_{n-t} は通信していない時間、 k_i は被験者*i*が感じる通信時の係数である。 k_i は、アンケート内で「通信している時は通信していない時に対して何倍電力を消費していると感じて通信していますか？」という質問に被験者が答えることで、求まる。このとき、通信していない時の単位時間当たりの消費電力 α の時の満足度と通信時の単位時間当たりの消費電力 $\alpha \times k_i$ の時の満足度は一致するとする。

4.3 通信速度と消費電力の多属性効用関数

4.2、4.3節で、通信速度、消費電力に対する単一効用関数を求めた。本節では、多属性効用関数法に基づいて、アンケートを行うことで、通信速度と消費電力を合わせた効用関数を求める。ある時間帯、電池残量における通信速度と消費電力に対する多属性効用関数は式(14)のように表される。

$$U(d, e) = K_d U_d(d) + K_e U_e(e) + (1 - K_d - K_e) U_d(d) U_e(e) \quad (14)$$

式(14)において、 d は通信速度、 e は通信時の消費電力、 $U(d, e)$ は通信速度と消費電力に対する多属性効用関数、 $U_d(d)$ 、 $U_e(e)$ はそれぞれ通信速度、消費電力に対する単一効用関数、 K_d 、 K_e は、それぞれ通信速度、消費電力に対するスケール定数である。

また、通信速度と消費電力に対する多属性効用関数は、被験者それぞれの満足度の平均であると考えられるので、式(15)のように表される。

$$U(d, e) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i(d, e) \quad (15)$$

式(15)において、 N は被験者数、 $U_i(d, e)$ は被験者*i*の通信速度と消費電力に対する多属性効用関数である。

また、式(15)の $U_i(d, e)$ を展開すると、式(16)のように表される。

$$U(d, e) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N k_{id} U_{id}(d) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N k_{ie} U_{ie}(e) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (1 - k_{id} - k_{ie}) U_{ie}(e) U_{id}(d) \quad (16)$$

式(16)において、 $U_{id}(d)$ 、 $U_{ie}(e)$ はそれぞれ被験者 i の通信速度、消費電力に対する単一効用関数、 k_{id} 、 k_{ie} は、それぞれ被験者 i の通信速度、消費電力に対するスケール定数である。式(14)と式(16)の第1項、第2項、第3項がそれぞれに相当するため、式(14)の第1項、第2項、第3項を得ることができれば、通信速度と消費電力に対する多属性効用関数が求まる。

次に被験者 i のスケール定数の求め方について述べる。スケール定数は、2つの無差別な点と确实等価な点を導き出すことで求まる。はじめに2つの無差別な点の導出の仕方について述べる。アンケート方法としては、事前に消費電力を優先するか通信速度を優先するかを答えてもらい、消費電力を優先する場合は図26のアンケートに、通信速度を優先する場合は図27のアンケートに答える[29]。被験者は、消費電力を優先する場合であれば、C点と無差別に感じるバッテリー消費量軸上の点を、通信速度を優先する場合であれば、B点と無差別に感じる通信速度軸上の点を答える。通信速度優先か消費電力優先かは、図26、27におけるB点とC点において、どちらがより好ましいかを答える事で判別する。

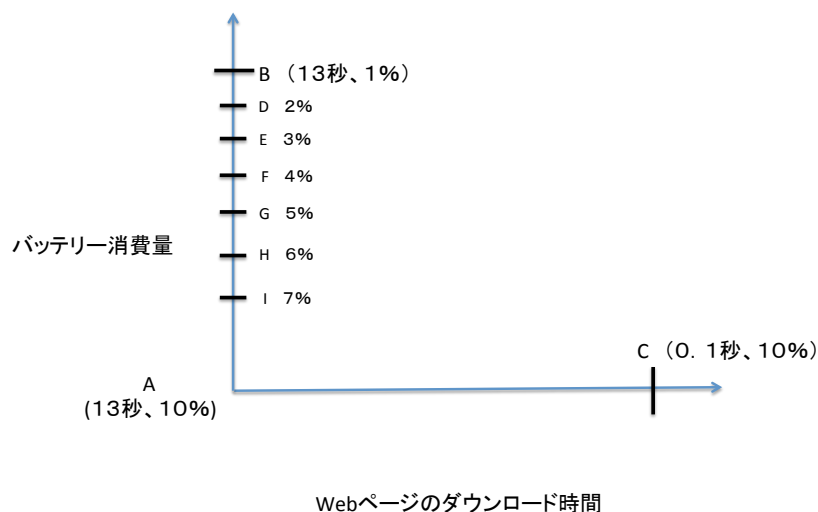


図26 消費電力優先な場合を対象とした無差別な点の導出

第4章 通信方式選択の有効性の検証

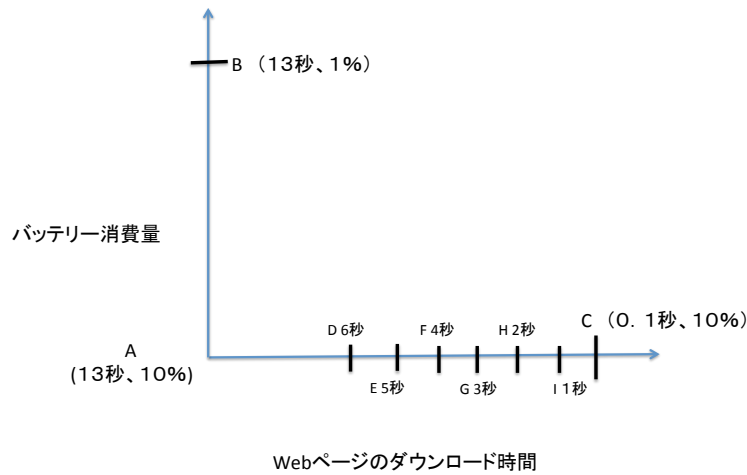


図 2.7 通信速度優先な場合を対象とした無差別な点の導出

被験者 i の多属性効用関数は式(16)のように求まる。

$$U_i(d, e) = k_{id}U_{id}(d) + k_{ie}U_{ie}(e) + (1 - k_{id} - k_{ie})U_{ie}(e)U_{id}(d) \quad (17)$$

ここで、図 2.6、図 2.7 による答案結果の点を α とすると、消費電力優先であれば、

$$U_i(13 \text{ 秒}, \alpha) = U_i(0.1 \text{ 秒}, 10\%) \quad (18)$$

通信速度優先であれば、

$$U_i(13 \text{ 秒}, 1\%) = U_i(\alpha, 10\%) \quad (19)$$

となる。

次に确实等価な点の導出の仕方について述べる。消費電力優先の場合は、「确实に得られる状況（Web ページのダウンロード時間：13 秒、電池消耗量：1 %）と、確率 p で（0.1 秒、1 %）が得られ、確率 $1-p$ で（13 秒、10 %）が得られる状況で 2 つの状況が無差別に感じられる確率 p 」を答える。通信速度優先の場合は、「确实に得られる状況（Web ページのダウンロード時間：0.1 秒、電池消耗量 10 %）と、確率 p で（0.1 秒、1 %）が得られ、確率 $1-p$ で（13 秒、10 %）が得られる状況で 2 つの状況が無差別に感じられる確率 p 」について答える。それぞれの答案の結果から以下の式が導きだされる。

第4章 通信方式選択の有効性の検証

消費電力優先であれば、

$$U_i(13 \text{ 秒}, 1\%) = pU_i(0.1 \text{ 秒}, 1\%) + (1-p)U_i(13 \text{ 秒}, 10\%) \quad (20)$$

通信速度優先であれば、

$$U_i(0.1 \text{ 秒}, 10\%) = pU_i(0.1 \text{ 秒}, 1\%) + (1-p)U_i(13 \text{ 秒}, 10\%) \quad (21)$$

式(18)と式(20)、式(19)と式(21)を解くことで、被験者*i*それぞれのスケール定数を求めることができる。

以上の結果を用いて、式(16)の第1項、第2項、第3項に対して、それぞれ最小二乗法を用いて、関数を推定する。推定方法は4.2、4.3節に準ずる。図28、29、30は電池残量100%～20%における、それぞれの時間帯における効用関数を表している。

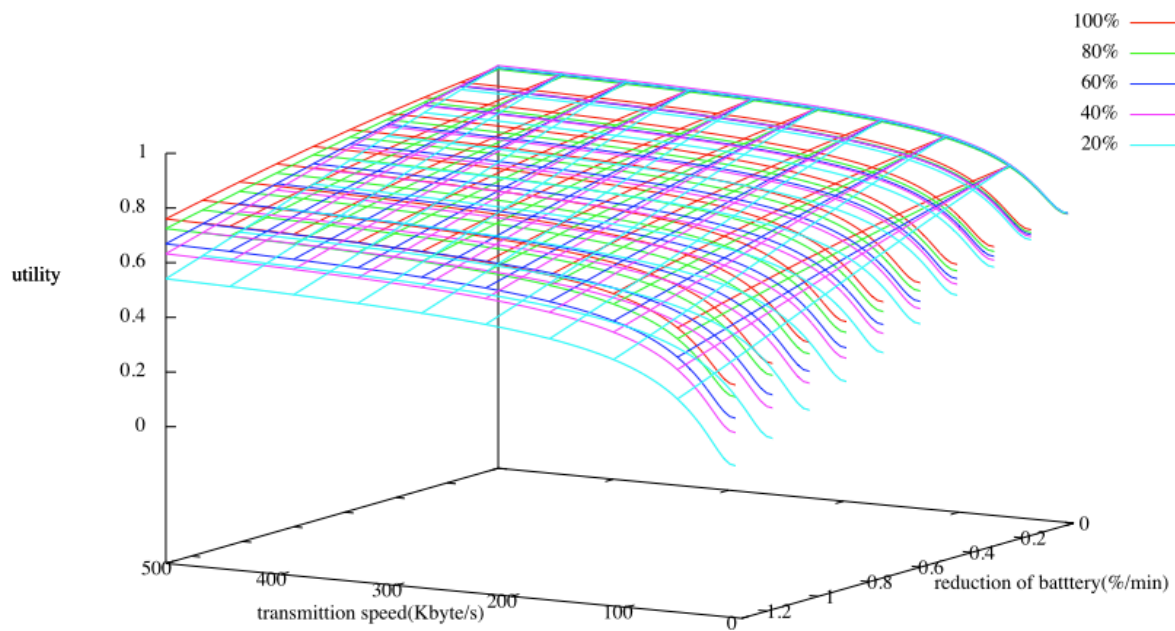


図28 朝8時における多属性効用関数

第4章 通信方式選択の有効性の検証

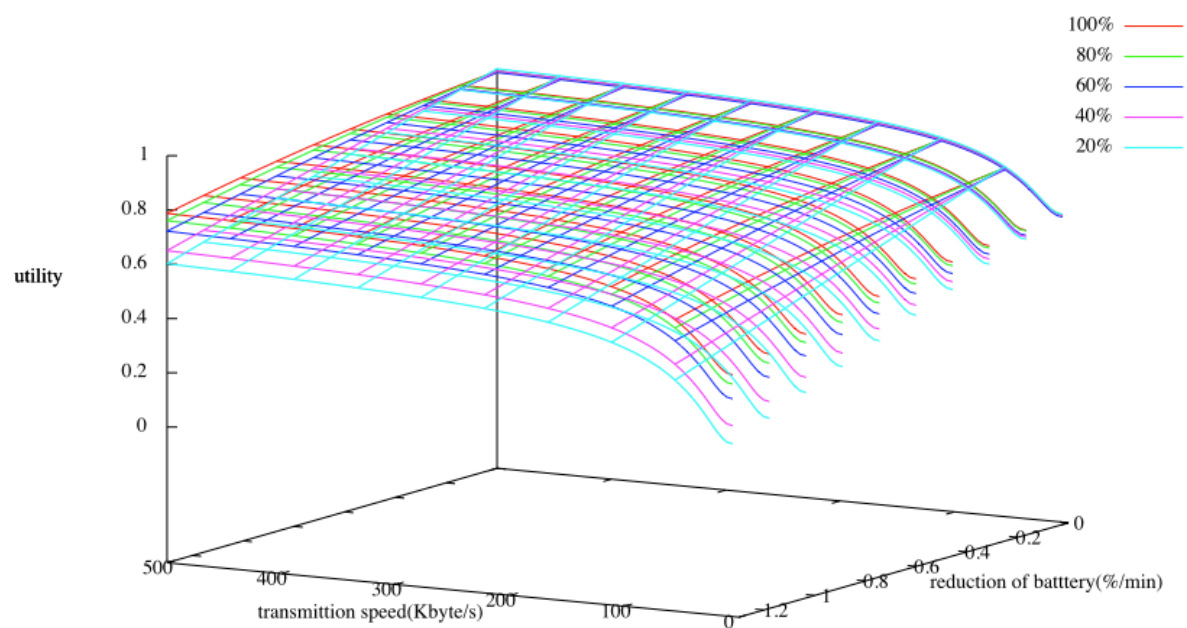


図 2 9 昼 1 2 時における多属性効用関数

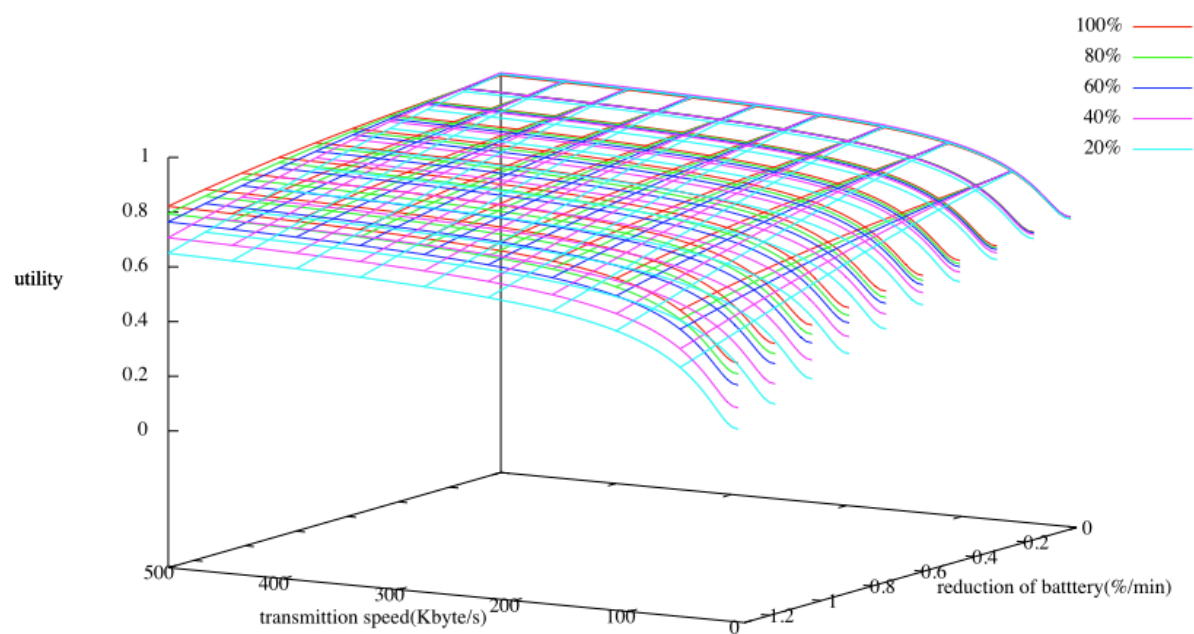


図 3 0 夜 1 8 時における多属性効用関数

第4章 通信方式選択の有効性の検証

以上の結果から時間帯が遅くなるほど、また電池残量が多いほど大きい通信速度を求める傾向が強まることが分かる。消費電力については、逆に、時間帯が早くなるほど、また電池残量が少ないほど小さい消費電力を求める傾向が強まることが分かる。

以上の結果を用いて、利用可能な無線通信方式のうち、最も効用の大きい無線通信方式を選択する。そのように選択することで、通信速度だけではなく、消費電力も考慮にいった、よりユーザーが満足できる通信方式の選択が可能となる。

4.4 評価実験

本節では、実際に Android 端末において Web ブラウザを利用して、いくつかの Web ページのダウンロードを行った際の通信速度、消費電力を測定し、その結果を用いて、4.3 節で求めた効用関数の評価を行った。

4.4.1 実験概要

本実験で使用した Android 端末は、サムスン・テレコミュニケーションズ・ジャパン社製の GALAXY S II LTE SC-03D (Model:Android4.0.4)であり、Docomo が提供する「Xi」に対応している。評価を行った通信方式はそれぞれ無線 LAN、LTE、HSDPA である。無線 LAN の規格は 802.11a である。また、LTE としては、NTT コミュニケーションズ社の OCN モバイル ONE の SIM カードにより通信を行った。受信時の最大通信速度は 112.5Mbps である。また、HSDPA としては、日本通信株式会社の b-mobile の SIM カードにより通信を行った。通信速度は下り上りともに最大 300kbps 超えである。

また、評価実験を行う上で通信速度の取得が必要となってくる。本実験では、通信速度の取得に Android アプリケーションの Network Log を用いた。Network Log は、送信先、受信先のアドレス、通信に使用したネットワークのプロトコルとインターフェース、送受信されたデータ量と時間を取得することができる。また、測定周期は 1ms である。Network Log によって取得した通信時間を用いて、通信速度は式(10)によって求める。

次に消費電力の測定方法について述べる。消費電力の測定は TRYGLE 社のモバイル電力測定器を用いて行った。図 3 1 はモバイル電力測定器の概観図である。モバイル電力測定器は端末に流れる電流、電圧を測定する事ができ、大きさは、約 60×135×200mm であるため、測定中に持ち運ぶ事が可能である。外部ストレージとして MicroSD が実装されており、記録をデバイスで行う事ができる。測定周期は 1ms か

第4章 通信方式選択の有効性の検証

ら選択可能である。また、モバイル電力測定器は、モバイル端末のバッテリーに直接基盤を取り付ける事で電流の測定を行っている。図3 2は、実際にバッテリーに基盤が取り付けられた時の図である。

通信時に消費した電力は式(22)によって求めている。

$$e = \frac{I}{C} \quad (22)$$

e は、単位時間あたりに消費したバッテリー容量、 I は通信時にバッテリーから消費された平均電流、 C はモバイル端末に搭載されているモバイルバッテリーの電池容量である。モバイルバッテリーの容量は 1850mAh のものを使用した。

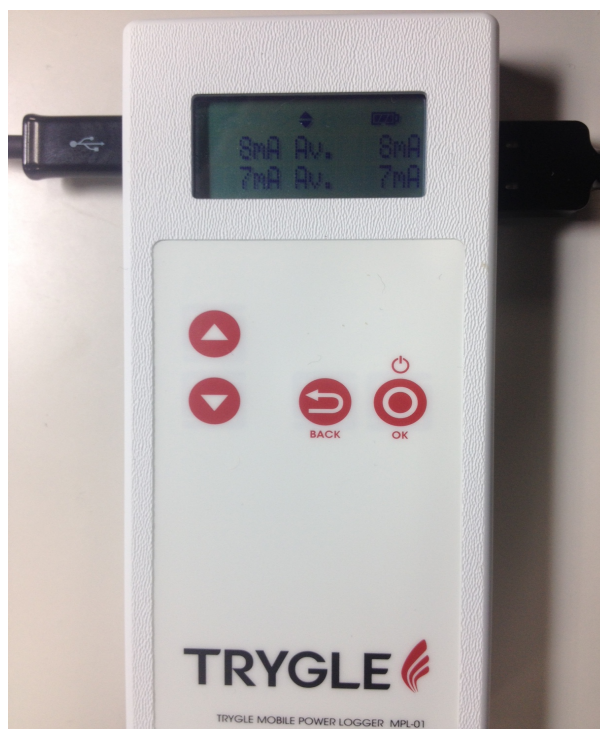


図3 1 モバイル電力測定器

第4章 通信方式選択の有効性の検証



図 3 2 電流の測定方法

また、通信ログの取得を行う Network Log とモバイル電力測定器は、別々のデバイスで測定が行われているため、2つの測定方法の同期を行う必要がある。同期は、TRYGLE 社の SCENARIO PLATER を用いて行った。手順を以下に示す。

1. 端末の画面を暗くした状態で、画面表示の輝度を最大にする
2. 5 秒後に画面を暗い状態から白い状態に変化させる
3. さらに 5 秒後に画像のダウンロードを行う。

図 3 3 は、実際の同期した時の図である。手順 1 と 2 は図 3 3 中の青い部分、手順 3 は黄色の部分で表されている。

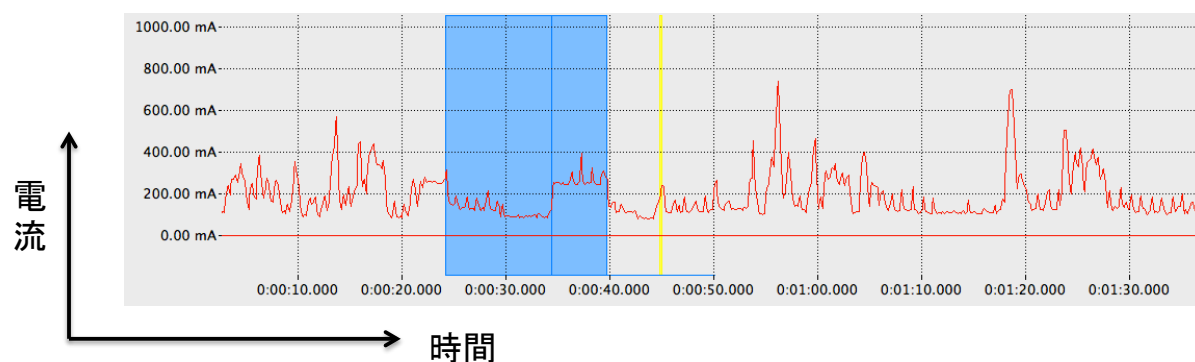


図 3 3 Network Log とモバイル電力測定器の同期

第4章 通信方式選択の有効性の検証

手順1と2により、SCENARIO PLATER とモバイル電力測定器の同期を行い、手順3により SCENARIO PLATER と Network Log の同期を行う事で、Network Log とモバイル電力測定器の同期を行っている。手順1を行う理由は、Android 端末において輝度の変化にはある程度の時間を要し、そのことにより電力測定器との同期の精度が落ちてしまうためである。以上によりモバイル端末における Web ページダウンロード時の通信速度と消費電力の測定を行っている。

次に本実験で行った Web ページのダウンロードの手順について述べる。本実験では、Web ブラウザとして Firefox を用いた。ダウンロードした Web ページは3種類で、画像と文字を含む HTML 形式のページであり、Web ページの大きさはそれぞれ異なる。実験の概要としては、はじめにキャッシュの削除を行い、次に約 65Kbytes、506Kbytes、1.15MBytes の Web ページのダウンロードと表示を、ダウンロードとダウンロードの間を10秒～30秒程あけながら行った。この手順を5回連続で繰り返し、その平均を実験結果として用いた。

4.4.2 実験結果と考察

本実験は無線 LAN、LTE、HSDPA の3種類について行い。更に無線 LAN については、電波状態が良い場合と悪い場合の2つのパターンに分けた。それぞれの電波強度は、電波状態が良い無線 LAN が-40dBm、電波状態が悪い無線 LAN が-77dBm、LTE が-105dBm、HSDPA が-93dBm である。実際に電流を測定した結果が図34である。図34は、各通信方式における、506Kbytes の Web ページのダウンロードを行った際の1回の試行についての、バッテリーから流れる電流の状態を表した図である。図34中の DL start は通信の開始を表し、DL finish は通信の終了を表しており、いずれも Network Log から取得した通信ログによる結果である。LTE や HSDPA の消費電力は高く、無線 LAN の消費電力は低い。この事は、携帯電話回線が広いエリアでの通信を可能としている通信方式の違いによる。

実験結果において、電波状態の良い無線 LAN のそれぞれのダウンロードの変動係数の平均は通信速度が 10.4、消費電力が 2.2、電波状態の悪い無線 LAN のそれぞれのダウンロードの変動係数の平均は通信速度が 13.2、消費電力が 1.2、LTE のそれぞれのダウンロードの変動係数の平均は通信速度が 4.8、消費電力が 1.4、HSDPA のそれぞれのダウンロードの変動係数の平均は通信速度が 14.5、消費電力が 2.9、となった。無線 LAN は、利用者による無線リソースの割り当てにより、変動が大きくなったと考えられる。電波が悪いとさらに通信が安定せず大きくなる傾向がある。

第4章 通信方式選択の有効性の検証

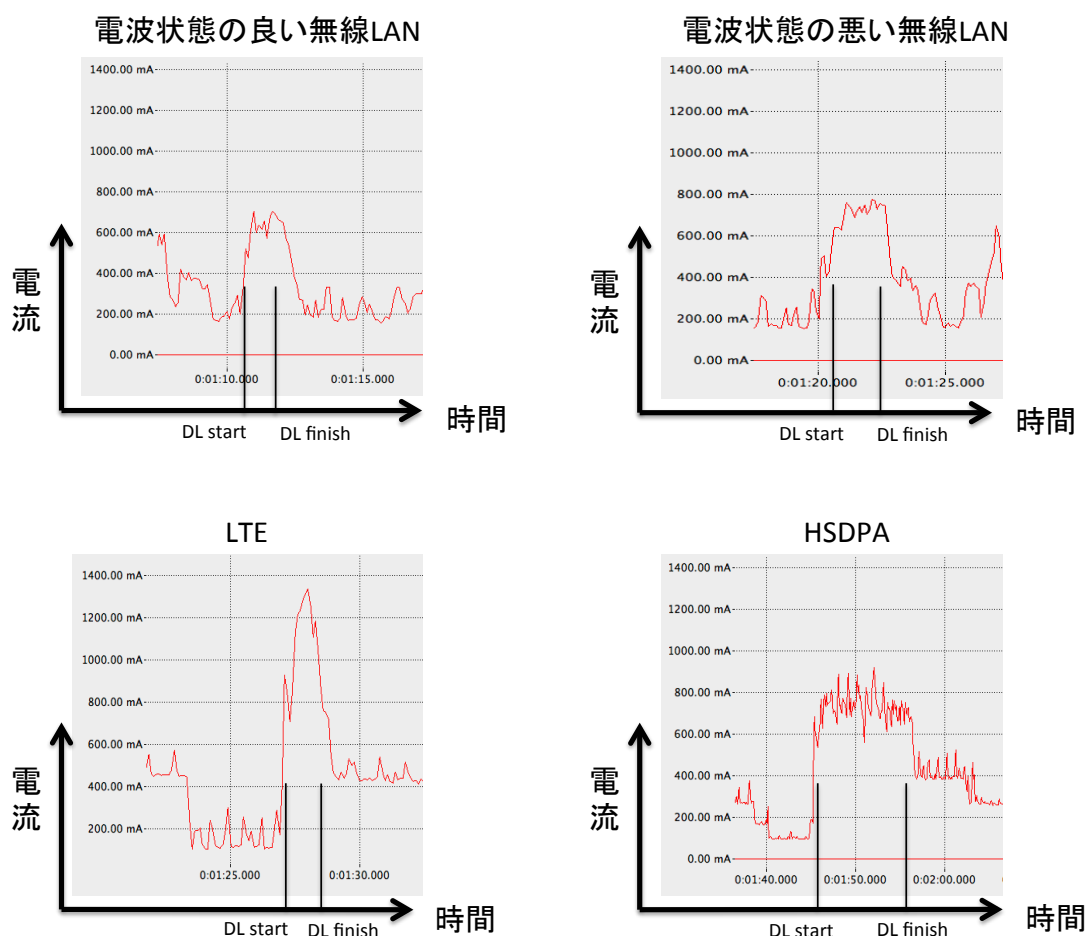


図 3 4 無線通信方式毎の消費電力

また、LTE や HSDPA などの携帯電話回線は通信終了後も、高い電力を数秒間維持している（図 3 5）。これは、携帯電話回線では、1 度通信をした後に、またすぐに通信をするだろうという仮定のもと、より早く通信をはじめるための実装である。例えば、HSDPA では、通信状態として、大きく分けて DCH、FACH、IDLE 状態の 3 つの状態を持っている。DCH 状態では、通信のための専用チャンネルを個別に割り当てられており、高い通信速度が得られる一方で消費電力も高い。通信が終わった後も、DCH 状態をしばらく保持し、数秒後に FACH 状態に移行する。FACH 状態では、専用のチャンネルは割り当てられず、共有のチャンネルが割り当てられる。FACH 状態では、通信速度は低いものの、消費電力は DCH 状態に比べて少ない。FACH 状態で再度データ通信を行う必要が出た場合に、データ通信が低くても大丈夫な場合は、FACH 状態のまま通信を行うが、高速な通信が必要な場合は、DCH 状態にもどる。FACH 状態でさらに数秒間、通信要求が来なかった場合は、IDLE 状態に移行する。

第4章 通信方式選択の有効性の検証

IDLE 状態では、RRC(radio resource control)接続は確立せずに、通信リソースが割り当てられない。IDLE 状態は他の2つの状態に比べて、格段に低い消費電力で維持される。また、LTE においては、大きく分けて、RRC_CONNECTED 状態と RRC_IDLE 状態の2つの状態がある。通信要求が発生すると、RRC_IDLE 状態から RRC_CONNECTED 状態に移行する。通信が終了すると、しばらく RRC_CONNECTED 状態を保持してから、RRC_IDLE 状態にもどる。HSDPA 同様に、RRC_IDLE 状態に比べて、RRC_CONNECTED 状態は大きく電力を消費する。また、LTE では、通信速度に比例して、消費電力が約 1000mW から 3500mW に変動することが知られている[30]。

以上のように携帯電話回線は通信が終了したあとも、通信に起因する電力を消費する。この事は通信方式選択の際にユーザーが感じる通信による消費電力ととると考えられるので、今後議論していく必要があるだろう。

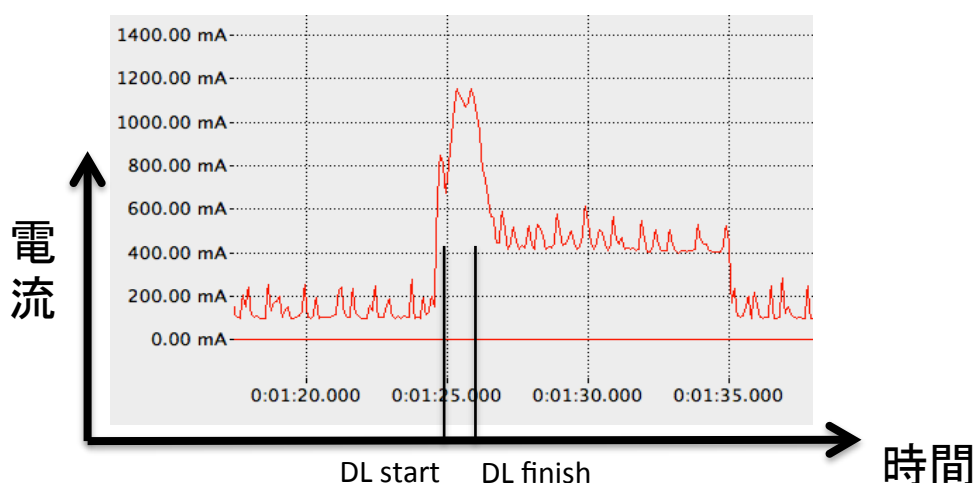


図3 5 LTE の RRC_CONNECTED 状態の維持

次に測定した結果を、前節で構築した多属性効用関数を用いて評価する。図3 6、3 7、3 8は、それぞれ朝8時、昼1 2時、夜1 8時に 65Kbytes の Web ページをダウンロードした時の多属性効用関数から導出される効用値を表した図であり、図3 9、4 0、4 1は、それぞれ朝8時、昼1 2時、夜1 8時に 506Kbytes の Web ページをダウンロードした時の効用値を表した図であり、図4 2、4 3、4 4は、それぞれ朝8時、昼1 2時、夜1 8時に 1.15Mbytes の Web ページをダウンロードした時の効用値を表した図である。

第4章 通信方式選択の有効性の検証

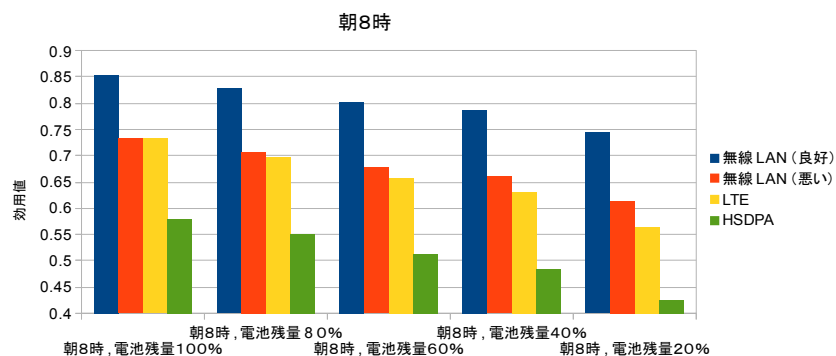


図36 朝8時に65KbytesのWebページをダウンロードした時の効用値

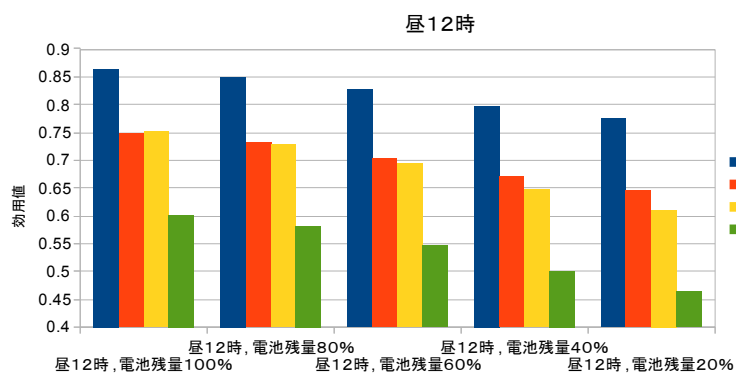


図37 昼12時に65KbytesのWebページをダウンロードした時の効用値

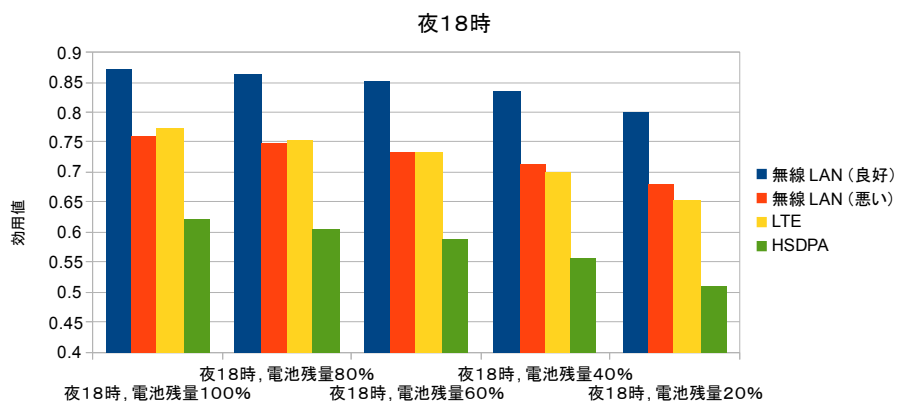


図38 夜18時に65KbytesのWebページをダウンロードした時の効用値

第4章 通信方式選択の有効性の検証

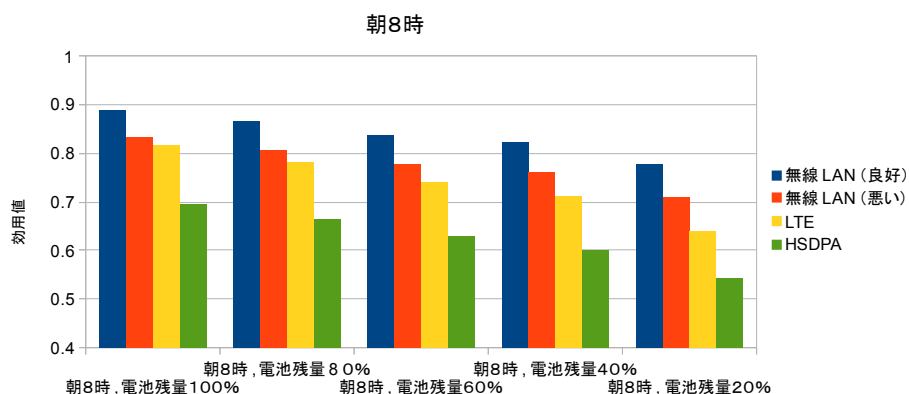


図39 朝8時に506KbytesのWebページをダウンロードした時の効用値

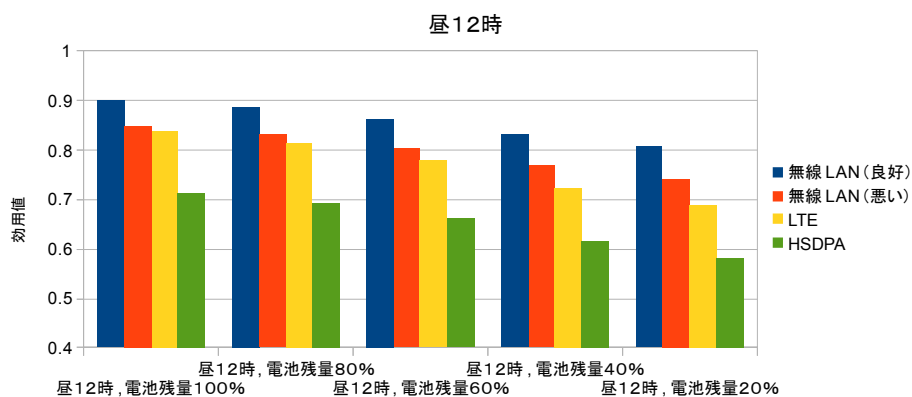


図40 昼12時に506KbytesのWebページをダウンロードした時の効用値

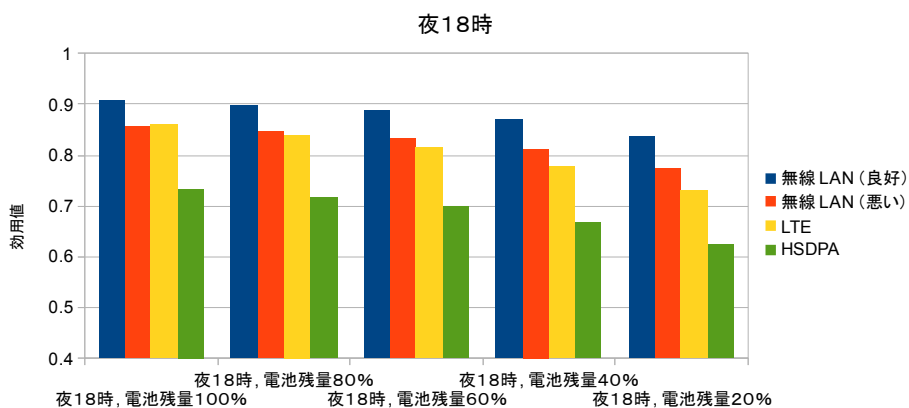


図41 夜18時に506KbytesのWebページをダウンロードした時の効用値

第4章 通信方式選択の有効性の検証

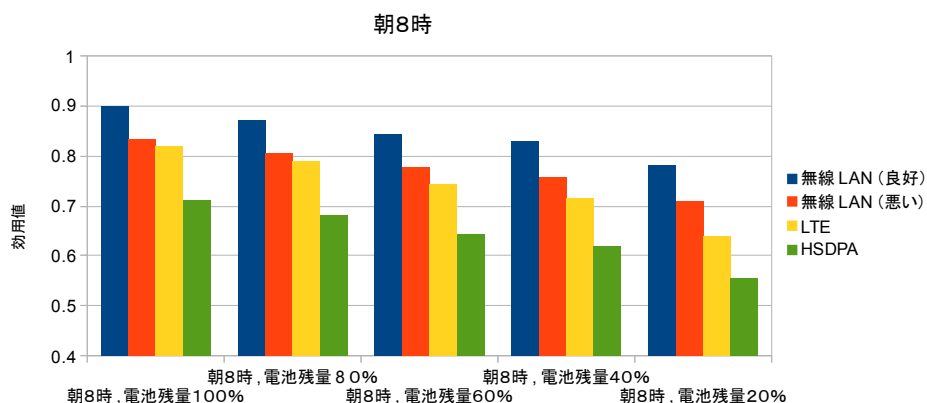


図4 2 朝8時に1.15MbytesのWebページをダウンロードした時の効用値

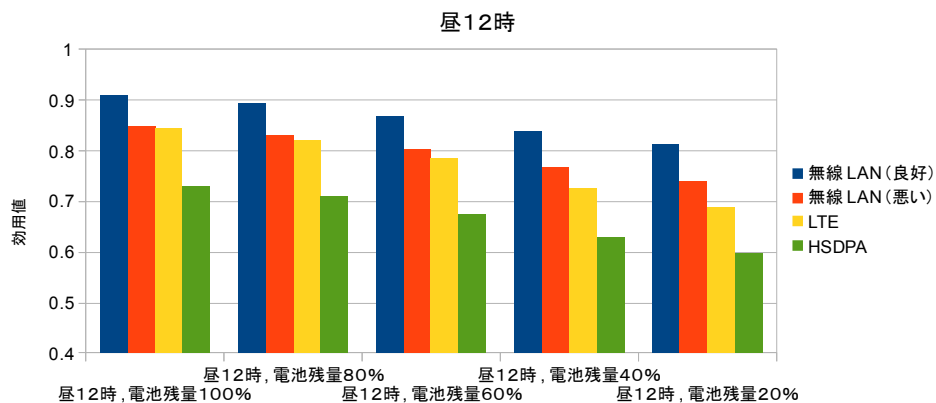


図4 3 昼12時に1.15MbytesのWebページをダウンロードした時の効用値

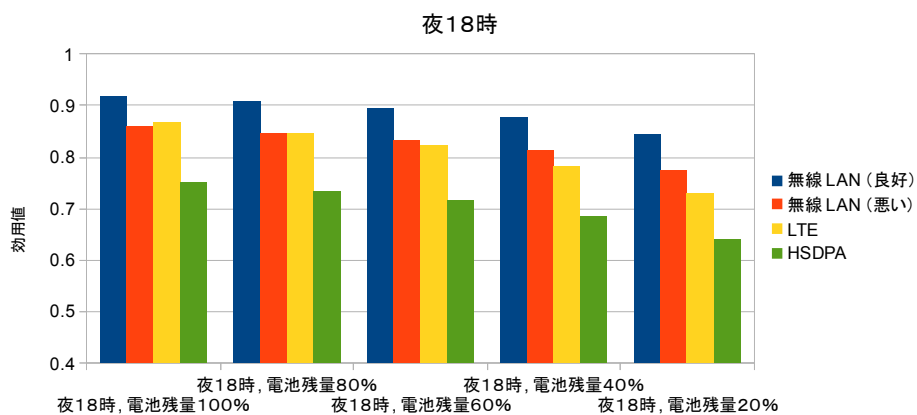


図4 4 夜18時に1.15MbytesのWebページをダウンロードした時の効用値

第4章 通信方式選択の有効性の検証

本実験において、電波状態の良い無線 LAN による通信は、通信速度、消費電力に対してともに効用が高く、多属性効用関数の観点からも常に最も効用が高い。HSDPA による通信は、無線 LAN とは逆に、通信速度、消費電力に対してともに効用が低く常に最も効用が低かった。この事は、実生活においても当てはまっていると言えるだろう。次に電波状態の悪い無線通信では、通信速度に対する効用が低いものの消費電力に対する効用は高く、逆に通信速度に対する効用が高く、消費電力に対する効用は低い LTE との通信と同程度の効用が得られた。本実験では、全体的に効用が高い結果となったが、この事は理想的なモバイルバッテリーを想定して得た結果であるためと考えられる。

また、ダウンロードする Web ページの大きさによって、通信速度のばらつきが見受けられ、Web ページの大きさが小さいほど通信速度が小さくなった。これは、Web ブラウザにおけるダウンロード先の Web サーバーとの通信の関係だと考えられる。通常 Web ブラウザは、Web サーバーからデータが送信されてくるまでに、IP アドレスの取得と通信先の Web サーバーとの TCP のコネクションを張る必要がある。そのため、Web ページのダウンロードが実際に始まる前に、一定の時間が必要となる。以上の事が通信速度のばらつきに大きく影響していたと考えられる。

次に、多属性効用関数による通信方式の選択とその他の手法との比較を、電波状態の悪い無線通信と LTE について行う。比較する手法として、通信速度による通信方式の選択手法と消費電力による通信方式の選択手法を挙げる。通信速度による通信方式の選択手法では、より速い通信が可能な通信方式の選択を行う。そのため、この手法は本実験において、常に LTE による通信を選択する。多属性効用関数による通信方式の選択では、例えば夜 18 時、電池残量が 100% の条件の時は、同様に LTE による通信の選択を行うが、朝 8 時、電池残量が 20% の条件のときは、無線 LAN の選択を行う。そのような選択を行うことで、通信速度による通信方式の選択手法と比較して、1 回の試行において、最大で、朝 8 時、電池残量が 20% 時に通信速度の効用値は 0.10 下がるものの、消費電力の効用値は 0.234 上がることが確認できた。次に消費電力による通信方式の選択手法との比較を行う。消費電力による通信方式の選択手法は、より電力の消費が抑えられる通信方式を選択する。本実験では、常に無線 LAN による通信を選択する。この手法と比較して、1 回の試行において、最大で、夜 18 時電池残量 100% 条件時に消費電力の効用値は 0.10 下がるもの、通信速度の効用値は 0.11 上がることが確認できた。通信速度による通信方式の選択手法と比較して、それほど効用値の差の増加が見受けられなかった。その理由として、通信速度による差がそれほど顕著には出ず、図 20 において、既に十分満足できる範囲に通

第4章 通信方式選択の有効性の検証

信速度があった事である。この事の要因として、通信速度についての効用値の測定において、単一の Web ページによる評価のみであった事による誤差があったと考えられる。よって、Web ページの大きさには比例せず、待ち時間と Web ページの両方についての効用関数の構築が必要だと考えられる。

第 5 章

実環境における検討

本章では、実環境を想定した時の通信方式選択手法について提案、検討をする。本研究では、通信方式の選択は実データの通信を行う前に、通信可能な経路と通信し、通信経路の状態を確認してから、行う必要である。しかし、1回の通信のみで、通信経路の状態から、通信時の消費電力を推定するのは難しい。この事は、通信時の消費電力は、通信による電力の消費だけではなく、ディスプレイの表示や、通信したデータを表示するのに必要な CPU による電力も含まれている事による。ディスプレイの表示は、そのときの画面の輝度に大きく依存するため、推定は比較的容易である。また、無線通信は通信速度や、通信モードの状態によって決まる[31]。Wi-Fi の消費電力は式(23)のように推定する事ができる。

$$P_{WiFi} = \beta \times p + \beta_{base_WiFi} \quad (23)$$

P_{WiFi} は、Wi-Fi による消費電力、 p は通信速度、 β は通信速度に対する消費電力係数、 β_{base_WiFi} は、Wi-Fi による通信におけるベース消費電力である。

また、携帯電話回線である 3G は、3つの通信状態の、IDLE 状態、FACH 状態、DCH 状態のそれぞれによって、異なる一定の電力を消費する。LTE では、Wi-Fi 同様に通信速度に比例して、約 1000mW から 3500mW の電力を消費する[30]。以上の事から、通信状態を把握する事によって、消費電力の推定は可能であると言える。

次に、CPU による消費電力について述べる。図 4 5 は LTE による通信において、Web ブラウザを使わずに Web ページをダウンロードした時のバッテリーから流れる電流の様子である。Web ページは 506Kbytes のものをダウンロードしており、図 3 4 においても同様の試行を行っている。電波強度も同条件である。図 3 4 と比較した時消費電力は約半分になっており、このことから、CPU が Web ブラウザの通信時における消費電力において、大きな割合を占めている事が分かる。次に CPU による諸消費電力の推定について述べる。CPU による消費電力は、式(24)のように推定され、搭載されている CPU の使用率と周波数に強く影響される。

$$P_{CPU} = (freq_1 + freq_2) \times util + \beta_{base_CPU} \quad (24)$$

P_{CPU} は CPU による消費電力、 $freq_1$ 、 $freq_2$ は、搭載されている CPU の周波数、 $util$ は、CPU の使用率、 β_{base_CPU} は、CPU の動作によるベース消費電力である。以上のことから、通信中の CPU による消費電力は、CPU の使用率によるものが多い。しかし、通信前に CPU の使用率を推定する事は困難である。

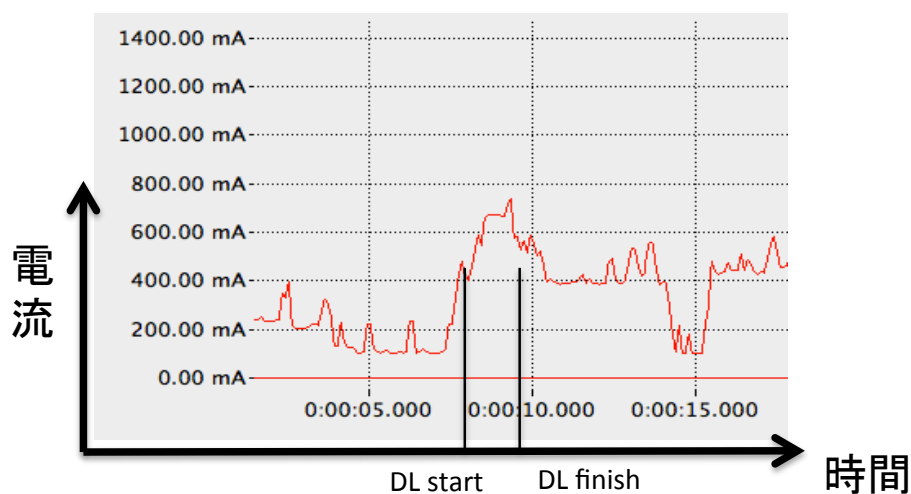


図 4 5 LTE による通信における通信による消費電力

また、CPU の使用率による消費電力は端末ごとに異なる。そこで、実環境における通信方式の選択時において、端末ごとに過去の情報を用いる事を提案する。通信方式の選択手法について、図 4 6 に示す。

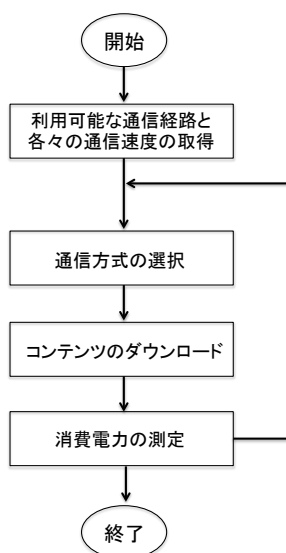


図 4 6 通信方式選択のフローチャート

通信方式の選択をする際に、まず現在の環境で利用可能な通信経路の取得とその通信経路の通信速度を取得する。次に取得した情報から最も効用の高い通信方式を選択

する。効用値は以下のように求める。ある通信方式、通信速度において、

$$U_{avg} = \frac{1}{t_{total}} \sum_{i=1}^N U_i \times t_i \quad (25)$$

U_{avg} は過去の効用の平均、 N は過去の通信回数、 t_{total} は通信時間の合計、 U_i は通信 i における多属性効用関数に基づいて算出された効用値、 t_i は、ある通信 i における通信時間。次に選択した通信方式により、必要なコンテンツのダウンロードを行う。同時に通信中に消費した消費電力を測定し、フィードバックを与える。

通信速度の測定方法はいくつか考案されている。FTP(File Transfer Protocol)は、あるファイルを転送して、ファイルのサイズと転送にかかった時間を測定することで通信速度の算出を行うが、測定に適したサイズのファイルを用意する必要がある。また、パケット単位では、単に ping を送信し、通信にかかった時間から通信速度を算出する方法や、輻輳の間隔で通信速度を測定する方法もある[9]。これらの手法は、測定の時間をかける程、長時間を見据えた時に精度が高くなる。一方で、本研究では、モバイル端末を想定しているためより速く測定し、消費電力を抑える必要がある。どのような手法が適しているかは今後検討していく必要があるだろう。また、端末が消費した電力は、端末側からアプリケーションとして測定する手法が提案されており、外部デバイスを必要としない方法も提案されている[30][31]。以上、通信方式の選択方法について検討を行ったが、今後評価等していく必要がある。

第 6 章

結論

6.1 まとめ

本論文では、無線 LAN や携帯電話回線の 3G、HSDPA、LTE が同時に利用可能である環境下において、効用関数を用いて、通信速度と消費電力を考慮にいたした通信方式の選択手法を提案した。さらに、実環境における、効用関数に影響を及ぼす要因をあげ、モデルについて述べた。

次に、アンケートを通して、通信速度と消費電力による多属性効用関数をいくつかの時間帯とモバイル端末の電池残量ごとに構築を行った。時間帯が遅い程、また電池残量が多い程、通信速度を求める傾向にある事を明らかにした。

それを用いて、実際に Android 端末の通信速度を Network Log により、また消費電力をモバイル電力測定器により測定し、構築した効用関数の評価を行った。通信速度による通信方式の選択と消費電力による通信方式の選択の両方について比較し、どちらについても、時間帯や状況によって、消費電力あるいは通信速度の効用値の減少に比べて、それ以上の効用値の増加が通信速度あるいは消費電力に見られ、提案手法の有効性が確認できた。

最後に、実環境を想定した、多属性効用関数を用いた効用値の取得方法について、述べた。

6.2 今後の課題

今後の課題としては、まずは効用関数に影響を及ぼす要因モデルの全体の適用である。年齢や性別、職業ごとの効用関数の特性については、多くの人に対するアンケートが必要となってくる。本論文のアンケートでは20才以上の大学生に対して行ったが、個人毎の満足度には開きがあった。この事は、普段利用している端末の種類や無線環境による影響等が考えられる。そのため、効用の傾向として、通信速度を優先や消費電力を優先するなどの項目を事前に作成、答えることで、ユーザーそれぞれにあった効用関数の作成が可能となる。また、ユーザー依存の環境属性については、ユーザーがスケジュール帳に書き込んだデータを基にして、1日の行動の推定や、普段充電している環境までの距離を GPS で取得し、充電できるまでの時間の計算をすることで、電池のやりくりをするなど、ユーザーの行動モデルの解析が必要となってくるだろう。

本研究では、通信速度の効用関数の取得の際に1つの Web ページに対して、アン

第6章 結論

ケートを行った。しかし、本研究における待ち時間に対する効用関数だけではなく、ダウンロードするものの大きさに対しても考慮に入れることで、よりユーザーが普段感じる満足度に近くなると考えられる。あわせて、効用関数の中に通信方式選択による消費電力のリスク管理を導入する事で、より実環境にあった選択が行える。

さらに評価実験として、無線 LAN や LTE、3G などだけではなく、それらを同時に利用する複数経路無線通信に対する評価も行う必要があるだろう。現在、無線通信の同時利用は実用化に向けた動きもあり、ユーザーにニーズに合っているかどうかの評価が今後必要となってくるだろう。

謝辞

本研究は、様々な方からのアドバイス、支えがあり進めていくことができました。この場をお借りしてお礼申し上げます。

修士からの2年間、研究の方針や実験の仕方など、様々な面で大変お世話になりました指導教員の相田仁教授に深くお礼申し上げます。非常にお忙しい中、実験機器の調達にも素早く対応して頂き、また研究で行き詰まっている時に親身に相談にのって頂き、深く感謝致します。また、研究室での生活を大きく支えて頂きました中山早百合秘書に深く感謝致します。研究室の生活で必要なものの用意や実験機器の調達の際に大変お世話になりました。学生生活についてのアドバイスも大変参考になりました。また、技術専門職員の千葉新吾氏には、研究室でいつも率先して、様々な事に対応して頂き、大変お世話になりました。お三方には、2年間を通して大変多くの事を学ばせて頂きました。

また、2年間の研究生活で、様々な面で支えて頂いた研究室の先輩、後輩の心よりお礼申し上げます。特に研究室の同期として、いつも優しく接してくれた渡邊圭寿氏に深く感謝致します。また、研究のアンケートにご協力頂きました皆様に心より感謝致します。

6年間の学生生活を深く支えて頂きました両親に心より感謝致します。本当にありがとうございました。

2014年2月6日

参考文献

- [1] K.Oguchi, D.tanaka, H.Tmozawa and H.Shigeno, “Link-based Connection Control for Bandwidth Aggregation in Multi-home Environment,” Transactions of Information Processing Society of Japan, vol. 50, No. 1, pp. 98-107, Jan. 2009.
- [2] Mariann Hauge, Margrete A. Brose, Jostein Sander, Mariann Hauge, Margrete A. Brose and Jostein Sander, ” Multi-Topology Routing for Improved Network Resource Utilization in Mobile Tactical Networks,” Military Communications Conference, 2010.
- [3] T.Pering, Y.Agarwal, R.Gupta and R.Want, “CoolSpots: Reducing the Power Consumption of Wireless Mobile Devices with Multiple Radio Interfaces,” MobiSys’ 06, Proceedings of the 4th international conference on Mobile systems, applications and services, 2006.
- [4] 福山陽祐, “Android端末におけるWi-Fi/3G間のシームレスハンドオーバーの提案と実装,” 2013.
- [5] Shahriar Nirjon, Angela Nicoara, Cheng-Hsin Hsu, Jatinder Singh and John Stankovic, “MultiNets: Policy Oriented Real-Time Switching of Wireless Interfaces on Mobile Devices,” IEEE 18th Real Time and Embedded Technology and Applications Symposium, 2012.
- [6] Tae-sub Kim, Ryong Oh, Sang-Joon Lee, Suk- Ho Yoon, Choong-Ho Cho, Seng-Wan Ryu, “Vertical Handover between LTE and Wireless LAN Systems based on Common Resource Management (CRRM) and Generic Link Layer (GLL),” ICIS’ 09 Proceedings of the 2nd International Conference on Interaction Sciences: Information Technology, Culture and Human, 2009.
- [7] 日本経済新聞, <http://www.nikkei.com/>
- [8] K.Nomura, K.Yamori, E.Takahashi, T.Miyoshi, and Y.Tanaka, “Waiting Time versus Utility to Download Images,” 4th Asia-Pacific Symposium on Information and Telecommunication Technologies, Kathmandu, Nepal/Atami, Japan, Session 5, pp. 128-132, Nov. 2001.

- [9] 野澤高弘, 本多倫夫, 榊原寛, 中澤仁, 徳田英幸, "Arms: Application-level concurrent multipath utilization on reliable communication," Internet Conference 2008 論文集, pp.108-113, Oct. 2008.
- [10] H.Sivakumar, S.Bailey and R.L.Grossman, "Psockets: The case for application-level network striping for data intensive applications using high speed wide area networks," In *Supercomputing, ACM/IEEE 2000 Conference*, pp. 38, Nov. 2000.
- [11] H.Sakakibara, M.Saito and H.Tokuda, "Design and implementation of a socket-level bandwidth aggregation mechanism for wireless networks," In WICON 06: Proceedings of the 2nd annual international conference on Wireless internet, pp. 11, New York, USA, 2006.
- [12] H.Hsieh, K.Kim and R.Sivakumar, "An end-to-end approach for transparent mobility across heterogeneous wireless networks," *Mob. Netw. Appl.* Vol. 9, pp. 363-378, August 2004.
- [13] Janardhan R. Iyengar, Paul D. Amer and Randall Stewart, "Concurrent multipath transfer using sctp multihoming over independent end-to-end paths," *IEEE/ACM TRANSACTIONS ON NETWORKING*, VOL. 14, NO. 5, OCT. 2006.
- [14] Kameswari Chebrolu and Ramesh R. Rao, "Bandwidth Aggregation for Real-Time Applications in Heterogeneous Wireless Networks," *IEEE TRANSACTIONS ON MOBILE COMPUTING*, VOL. 5, NO. 4, April 2006.
- [15] D. S. Phatak and T. Goff, "A Novel Mechanism for Data Streaming Across Multiple IP Links for Improving Throughput and Reliability in Mobile Environments," In IEEE INFOCOM 2002, New York, June 2002.
- [16] Etsuko Miyazaki and Masato Oguchi, "Evaluation of Buffer Size for Middleware using Multiple Interface in Wireless Communication," In Proc. the Tenth International Conference on Networks (ICN2011), pp. 202-205, St. Maarten, The Netherlands Antilles, January 2011.
- [17] ITU-T Recommendation P.800, "Methods for subjective determination of transmission quality," Aug, 1996.
- [18] 片山洋明, 出雲信幸, 東野武史, 塚本勝俊, 小牧省三, "携帯電話サービス利用料金に対するユーザー効用の測定とユーザー効用に応じた無線リソースマネジメント," IEICE Technical Report MoMuC2, pp. 61-66, July 2007.
- [19] MMD 研究所, バッテリーに関する満足度調査, <http://mmd.up-date.ne.jp/>
- [20] "Energy Scavenging for Mobile and Wireless Electronics," published by the IEEE ComSoc

2005.

- [21] 村瀬勉, 新熊亮一, 長谷川剛, 矢守恭子, 小口正人, 太田能, “パレート最適ネットワーク制御技術の実現に向けて,” IEICE Technical Report, MoMuC2011-22, pp33-38., Sep. 2012
- [22] 大石卓史, 大南絢一, 田村典江, 八木信行, “水産エコラベル製品に対する消費者の潜在的需要の推定,” Nippon Suisan Gakkaishi, 2010.
- [23] 満田透, 小林康弘, 野中久典, “多属性効用理論を応用した知識獲得方式,” 情報処理学会論文誌, June 1990.
- [24] 本城勇介, 松尾稔, “多目的意思決定法によるエネルギー使用量を考慮した構造物,” 1999.
- [25] International Journal of Production Economics, Vol. 97, Issue 3, Sep. 2005.
- [26] Keeney, R.L., “Multiplicative Utility Functions,” Operations Research, 22, pp. 22-34, 1974.
- [27] 山本尚生, 井上明也, “通信サービス分析・評価への選択行動モデルの適用,” オペレーションズ・リサーチ, 経営の科学, 1997.
- [28] YOMIURI ONLINE, <http://www.yomiuri.co.jp/>
- [29] 岡本眞一, “商品選択問題についての多属性効用関数法の応用,” 経営情報科学 2(3), pp. 227-234, Dec. 1989.
- [30] J. Huang, F. Qian, A. Gerber, Z. M. Mao, S. Sen, O. Spatscheck, “A Close Examination of Performance and Power Characteristics of 4G LTE Networks,” Proceedings of the 10th international conference on Mobile systems, applications and services, pp. 225-238, 2012.
- [31] L. Zhang, B. Tiwana, Z. Qian, Z. Wang, R. P. Dick, Z. M. Mao, L. Yang, “Accurate Online Power Estimation and Automatic Battery Behavior Based Power Model Generation for Smartphones,” CODES/ISSS’10 Proceedings of the eighth IEEE/ACM/IFIP international conference, 2010.

発表文献

蟹江教佳, 相田仁, “効用関数に基づく無線通信経路の選択手法”, 電子情報通信学会
情報ネットワーク研究会, Mar. 2014 (予定)