

待ち時間に対するユーザ効用の測定と無線リソースマネジメントへの 適用方式

飯田 有慈 蓑田 佑紀 塚本 勝俊 小牧 省三

大阪大学大学院 工学研究科 電気電子情報工学専攻

E-mail : handa@roms.comm.eng.osaka-u.ac.jp

あらまし 厳しい帯域制限やフェージング変動によって高速伝送が困難な無線通信環境において、限られた無線リソースの高効率利用と、待ち時間に対するユーザの満足度（ユーザ効用）の向上を両立する無線リソースマネジメントを行う電波エージェントの実現には、まず、電波エージェントがユーザ効用を無線リンクの所要パラメータに変換するための効用関数を求める必要がある。本稿では通信サービス品質としてデータダウンロードにかかる待ち時間に注目し、ユーザの待ち時間に対するユーザ効用を主観評価実験により明らかにし、待ち時間と満足度の関係を表す効用関数を導出し、そのアプリケーション利用状況による違いについて検討する。さらに、得られた複数の効用関数を用いたユーザ効用に基づく無線リソースマネジメントを提案し、計算機シミュレーションにより提案方式の有効性を示す。

キーワード ユーザ効用, 待ち時間, 無線リソースマネジメント, 電波エージェント

Measurements of Utility for Latency Time and its Application to Radio Resource Managements

Yuji HANDA Yuki MINODA Katsutoshi TSUKAMOTO Shozo KOMAKI

Department of Electrical, Electronic and Information Engineering, Graduate School of Engineering, Osaka
University

E-mail : handa@roms.comm.eng.osaka-u.ac.jp

Abstract In a wireless environment, achieving high data rate transmission is difficult because of bandwidth limits and phasing. It is necessary to manage radio resources efficiently to reduce latency time and improve users' utility for latency time. For that purpose, we have to make the relation between latency time and utility clear. In this paper, we measured utility functions for latency time and its dependence on users' situation. Moreover, we propose a radio resource allocation scheme based on utility for latency time, and evaluate the availability of proposed scheme by computer simulation.

Keyword Utility, Latency, Radio Resource Management, Radio Agent

1. まえがき

来るブロードバンドユビキタスネットワークでは、ユーザは種々のエアインタフェース形式の無線アクセスサービスを利用することができるようになり、これらを選択したり、複数の同時に使用するという状況に進むものと考えられる。このような複数の無線ネットワークを一つのネットワークとして運用する異種ネットワーク運用には、無線リンク部分のレイヤ1, 2での制御だけでは不十分であり、レイヤ3, 4での有線・無線を一体とした制御が必要となってくる。しかし、これによって周波数資源の有効利用や転

送されるコンテンツに応じたネットワーク選択などオペレーション側の最適運用（オペレーションスタイル）を一部実現できるものの、今後は利用するユーザの意志や要求をくみ取った最適運用が必要になってくる。このようなユーザスタイルにも対応しつつ、周波数資源やネットワーク資源の有効利用も両立する最適なネットワーク運用には、ユーザ端末やネットワークのレイヤ7に位置する電波エージェント [1] が、レイヤ7からユーザの満足度をも考慮したレイヤ1までの下位層を制御する必要があると考えられる。さて、このような通信サービスに対するユーザの満足度とい

う指標（ユーザ効用）、また、ユーザ効用の平均値（MOS:Mean Opinion Score）の関係を数式化した効用関数については、効用関数を利用した通信リソース割当ての最適化手法が検討されている[2-4]。効用関数はサービスとサービスに対するユーザの主観的満足度であるユーザ効用の平均値（MOS:Mean Opinion Score）の関係を数式化したものである。例えば、ユーザがインターネットを利用してダウンロードサービスを利用する場合、コンテンツ取得までの待ち時間が長いとユーザ効用は低下し、待ち時間が短いとユーザ効用は向上する。あるいは、ユーザが動画像を見る場合、動画像の品質が悪いとユーザ効用は低下し、動画像の品質が良いとユーザ効用は向上する。

無線通信環境では厳しい帯域制限やチャネルのフェージング変動などによって高速な伝送速度を達成することが困難である。ユーザがデータダウンロードサービスを利用する場合、無線通信チャネルの劣化はユーザにとっては待ち時間の増大となって現れるため、コンテンツを取得するまでの待ち時間の増大が不可避である。そのため、ユーザの要求に応じた無線リソースマネジメントを行い、限られた無線リソースを効率良く利用し、待ち時間の短縮とユーザ効用の向上を図るための制御を行う必要がある。

文献[2]では無線LANスポットアクセスにおいて電波エージェント[1]が待ち時間とユーザ効用の関係を表す効用関数に基づき、待ち時間の短縮とユーザ効用の向上を実現するためのタイムスロット割当てを行う方式を提案している。また、文献[3]では有線通信環境において、待ち時間とユーザ効用の関係を表す効用関数を仮定し、ユーザ全体の効用が最大となるよう、優先制御を行う方式を提案している。いずれの場合も単一の効用関数を想定しているが、ユーザのアプリケーション利用状況に応じて変化する効用関数を用いれば、より最適な無線リソース割当てが実現できるものと考えられる。

ユーザのアプリケーション利用状況に応じた無線リソース割当てを行うには、利用状況に応じて異なる効用関数を明らかにする必要がある。試みがこれまでになされている。文献[4]ではユーザ効用に基づいた優先制御を行うためにウェブブラウザ上のリンクをクリックし静止画を表示するまでの待ち時間とユーザ効用の関係を実験により測定している。しかし、文献[4]で検討されているのは残り待ち時間が表示されないウェブブラウザのみを操作している状況で得られた待ち時間とユーザ効用の関係であり、ウェブブラウザとは異なるアプリケーションや複数のアプリケーションを同時に利用している状況への適用には不十分である。

そこで本稿では、ユーザがデータダウンロードサービスを利用する場合に、ユーザのアプリケーション利用状況によって異なる待ち時間に対するユーザ効用の違いに着目して、その主観評価実験から効用関数の違いについて検討する。さらに、得られた効用関数を用いたユーザ効用に基づく無線リソースマネジメントを提案する。



図1 実験画面 (Web-F)

2.主観評価実験

2.1 主観評価実験の方法

主観評価実験はユーザの注意がコンテンツのダウンロードに向けられているフォアグラウンドタスクと、ユーザの注意がコンテンツのダウンロードに向けられていないバックグラウンドタスクについて4つの実験を実施した。実験は主観評価実験用に作成したアプリケーションを被験者が操作することで進行する。

2.2 実験1～3 (Web-F, FTP-F, FTP-B)

実験1 (Web-F) ではフォアグラウンドでウェブブラウジングを行い、ユーザが要求を発生してからウェブサイトが表示されるまでの待ち時間に対するユーザの満足度について評価を行う。この実験では残りの待ち時間を被験者に通知せず、画面上のプログレスバーは回転するだけである。表示するウェブサイトは4種類の検索サイトであるが、表示される内容が評価の対象とならないよう被験者に説明を行った。

実際の実験に用いた画面を図1に示す。まずはじめに"基準"ボタンを押すと、基準時間0秒でウェブサイトを表示する。次に"読み込み"ボタンを押すと、指定した待ち時間後にウェブサイトが表示される。最後に"評価"ボタンを押すと、評価画面に進み主観評価を行う。これを1回の評価とし、ゲーム2つを含む16回の評価を行った。また、前に行った評価での影響を無視できるようにするため、被験者毎に指定する待ち時間の順序をランダムに変えた。また、連続して評価を行うことへのストレスを軽減するため、画面右下には残りの評価回数がかかるように表示をした。

実験2 (FTP-F) ではフォアグラウンドで動画像ファイルのダウンロードをFTPにより行い、動画像が表示されるまでの待ち時間に対するユーザの満足度について評価を行う。この実験ではダウンロードの進行状況をプログレスバーによりユーザに通知することで、およその残り待ち時間が分かるようになっている。ダウンロードするファイルは単一の動画像であるが表示される動画像が評価の対象とならないよう被験者に説明を行った。また、動画像をすべて見終

わる必要はない。また、実験画面の操作方法は実験1と同様である。

実験3 (FTP-B) では実験2と同様にFTPによるファイルダウンロードを行い、待ち時間に対するユーザの満足度について評価を行なうが、ダウンロードが完了するまでの待ち時間もフォアグラウンドタスクとしてウェブブラウザを利用したウェブサイトの閲覧ができるため、ユーザの注意はコンテンツのダウンロードよりも、ウェブブラウザの方に多く向けられている。ウェブサイト閲覧中にダウンロードが完了すると強制的にウェブブラウザを終了するため待ち時間とは異なるストレスが生じるが、その点については評価しないよう説明を行った。また、実験画面の操作方法は実験1と同様である。

2.3 実験4 (Web-F2, FTP-F2)

被験者が日ごろからインターネットを使用している場合、ウェブブラウザを使っているときは待ち時間は短く、FTPアプリケーションを使っているときは待ち時間が長くなりがちであるという先入観をもっている可能性がある。そこで、実験4として待ち時間の通知とアプリケーションに対する先入観のいずれがユーザ効用に大きく影響しているのかを確認するため、実験1 (Web-F) で用いた画面でダウンロードの進行状況をプログレスバーにより待ち時間を通知する場合と、実験2 (FTP-F) で用いた画面で待ち時間を通知しない場合について同様に主観評価実験を行った。待ち時間通知の有無以外の条件は実験1 (Web-F)、実験2 (FTP-F) と同様である。

2.4 実験機器の構成

実験機器の構成を図2に示す。実験で表示される静止画像や動画像のデータはネットワーク遅延による評価の低下を防ぐため、実験で使用する機器に内蔵されたハードディスクに保存したものを利用する。ただし、実験3 (FTP-B) においてフォアグラウンドタスクでウェブブラウザを使う場合は、ユーザが自由にウェブサイトを閲覧できるようにするためウェブブラウザが読み込むデータのみインターネットからダウンロードする。

2.5 評価方法

主観評価実験は国際電気通信連合通信部門 (ITU-R) で動画像の主観評価法として勧告されている ITU-R BT.500-10[5] に定められた二重刺激劣化尺度法 (DSIS: Double-stimulus impairment scale) の提示法 Variant II に従い実施した。DSIS Variant II は絶対品質となる基準画像の提示と評価対象となる評価画像の提示を繰り返す方式であるが、今回は基準時間の提示と評価時間の提示を繰り返す形で実験を行った。また、主観評価にバイアスが入らないようにするため設定した待ち時間は被験者には秘匿した。

評価方法については、基準と比較した待ち時間に対する

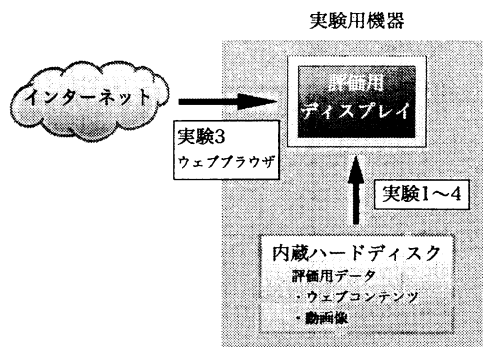


図2 実験機器の構成

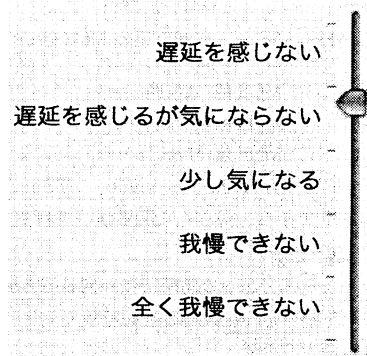


図3 評価語と評価用スライダー

劣化の度合いを図3に示す5段階劣化尺度に基づいて判定する。ただし、評価語は実験に合わせて変更した。被験者は同図に示す評価用スライダーを操作して回答する。スライダーはグラフ上ならどこにでも設定できるため実際には連続尺度となっている。評価値は最低値0、最高値1とする。

2.6 実験1~3の結果

待ち時間に対するユーザ効用を集計しMOS値を求め、待ち時間とMOS値の関係を表す効用関数を推定する。MOS値は被験者数 n 、被験者 i の評価値 a_i として下記のように求められる。

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

実験1~3での被験者数は42人 (男性31人、女性11人) である。被験者の年齢は主に20代、そのほとんどが本大学大学院の学生であり、日ごろからインターネットを利用している。

実験結果より得られた待ち時間に対するMOS値を図4に点で示す。横軸はボタンを押してからコンテンツが表示されるまでの待ち時間、縦軸はそれに対するMOS値である。同図には実験1、2、3の結果をそれぞれWeb-F、FTP-F、FTP-Bとして示す。

得られた結果をそれぞれ最小二乗法により指数関数で近似すると

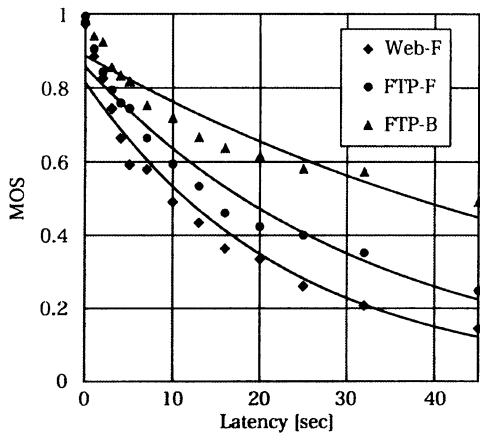


図4 待ち時間に対するユーザ効用のMOS値(実験1~3)

$$\text{Web-F} : \text{MOS 値} = 0.808e^{-0.0418t} \quad (2)$$

$$\text{FTP-F} : \text{MOS 値} = 0.853e^{-0.0295t} \quad (3)$$

$$\text{FTP-B} : \text{MOS 値} = 0.882e^{-0.0150t} \quad (4)$$

となる。寄与率は Web-F が 0.950, FTP-F が 0.949, FTP-B が 0.889 である。得られた関数はいずれも

$$\text{MOS 値} = A_e^{-k_t} \quad (5)$$

の形となっている。3つの効用関数が同じ待ち時間に対し異なる MOS 値を示す主要な要因は k_t の値であり、 A_t の値はいずれもほぼ同一である。

これらの関数を図4に実線で示す。同図から分かるように、いずれの実験でも待ち時間の増加に伴ってユーザ効用が指数関数に従って減少する傾向を示す。待ち時間に対する MOS 値の減少率は Web-F が最も大きく、FTP-B が最も小さかった。この結果は、コンテンツ取得をバックグラウンドで行う場合には、ユーザが待ち時間の増大に対して鈍感になることを顕著に表している。また、待ち時間に対する MOS 値の減少率を Web-F と FTP-F について比較すると、FTP-F の方が小さくなっている。この結果から、残りの待ち時間が分かることによっても、ユーザが待ち時間の増大に対して鈍感になるということがわかる。

2.7 実験4の結果

実験1~3と同様に待ち時間に対するユーザ効用を集計し MOS 値を求め、待ち時間と MOS 値の関係を表す効用関数を推定する。実験4での被験者は23人(男性20人、女性3人)である。被験者の年齢は主に20代、そのほとんどが本大学大学院の学生であり、日ごろからインターネットを利用している。

実験結果より得られた待ち時間に対する MOS 値を図5に示す。横軸はボタンを押してからコンテンツが表示されるまでの待ち時間、縦軸はそれに対する MOS 値である。同図には実験4の2つの結果をそれぞれ Web-F2, FTP-F2 とし示す。

得られた結果をそれぞれ最小二乗法により指数関数で近似すると

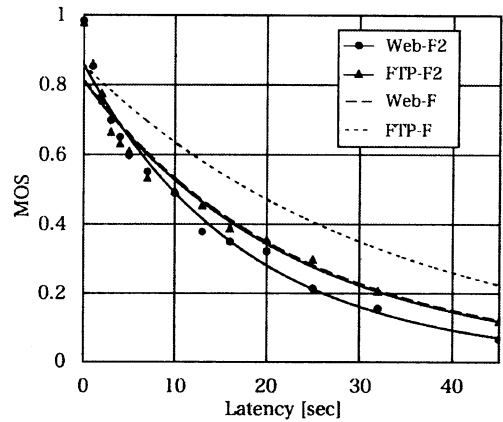


図5 待ち時間に対するユーザ効用のMOS値(実験4)

$$\text{Web-F2} : \text{MOS 値} = 0.844e^{-0.0538t} \quad (6)$$

$$\text{FTP-F2} : \text{MOS 値} = 0.798e^{-0.0412t} \quad (7)$$

となる。寄与率は Web-F2 が 0.973, FTP-F2 が 0.939 である。

これらの関数を実線で図5に示す。また、式(2)、式(3)で表される Web-F と FTP-F の近似曲線を波線で同図に示す。実験3と同様に実験4の結果も待ち時間の増加に伴ってユーザ効用が指数関数に従って減少する傾向を示す。Web-F と Web-F2 を比較するといずれも同じような結果を示している。このことから、ユーザがウェブブラウザを利用する場合、待ち時間の通知の有無はユーザ効用に大きな影響を与えないということが分かる。これはウェブブラウジング時は待ち時間が短いというウェブブラウザに対する先入観が支配的な要因となっていると考えられる。また、FTP-F と FTP-F2 を比較すると、待ち時間に対する MOS 値の減少率は FTP-F2 の方が大きく、Web-F の結果に近づいている。このことから、ユーザが FTP アプリケーションを利用する場合、待ち時間の通知の有無がユーザ効用に大きな影響を与え、待ち時間を通知したほうが待ち時間の増大に対して鈍感になるということが分かる。これは、ウェブブラウザと比べると FTP アプリケーションの利用頻度が低いため、先入観があまりないためと考えられる。

3. ユーザ効用に基づく無線リソースマネジメント

3.1 システム構成

図6に提案方式のシステム構成を示す。無線基地局(Base Station)はレイヤー7ルータ(Layer 7 Router)を介してインターネットに接続している。スポット内でユーザがデータを要求すると、端末はユーザが利用中のアプリケーション情報を電波エージェント(Radio Agent)に送信する。電波エージェントは受信したアプリケーションの情報から提案アルゴリズムに基づいて各ユーザのタイムスロット数を決定する。パケット処理装置(Packet Processing Unit)は電波エージェントの示す伝送パラメータをパケッ

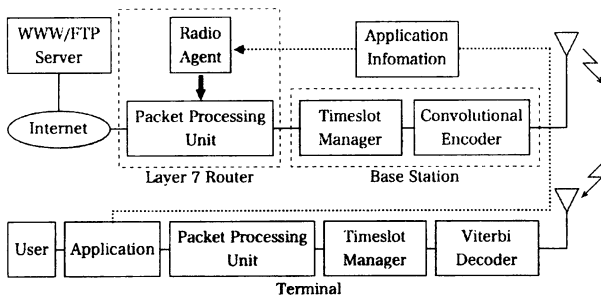


図6 システム構成

このデータリンクヘッダに挿入する。無線基地局では、このヘッダに従ってタイムスロットマネージャ (Time Slot Manager) によるスロット割当て、畳み込み符号化器 (Convolutional Encoder) による誤り訂正符号化が行われ、端末に無線信号が送信される。

端末では、データリンクヘッダに従って復調や復号が行われる。端末の受信信号はビタビ復号化器 (Viterbi Decoder) によって誤り訂正復号化が行われた後、タイムスロットマネージャによって自局当分のデータフレームリンクが選択され、パケット処理装置によって受信パケットがアプリケーションのデータ単位に組み立てられる。

3.2 タイムスロット割当てアルゴリズム

本アルゴリズムでは実験 1~3 で得られた結果に基づき、待ち時間が通知されるフォアグラウンドタスク (Web-F)、待ち時間が通知されないフォアグラウンドタスク (FTP-F)、バックグラウンドタスク (FTP-B) に対応する 3 つのアプリケーション (アプリケーション i ($i=1, 2, 3$) と呼ぶ) を仮定し、アプリケーションを利用するユーザ数を n_1, n_2, n_3 とする。無線スポット内の全ユーザ数を J とし、無線リソースの割当ては TDM (全タイムスロット数 X) を仮定して各ユーザに割当てるタイムスロット数で制御するものとする。実験 1~3 で得られた効用関数から同じユーザ効用を達成するのに許容できる待ち時間にアプリケーション間では違いがあることが分かる。例えば MOS 値を 0.6 とするとアプリケーション i ($i=1, 2, 3$) に対して許容する待ち時間はそれぞれ 8, 12, 26 秒となる。これはタイムスロットを割当てるとき許容待ち時間が大きいほど、割当てる無線リソースが少なくとも良いことを意味している。そこで、アプリケーション i ($i=1, 2, 3$) のそれぞれを利用するユーザグループ i に割当てるタイムスロット数 \hat{x}_i ($x_1+x_2+x_3=X$) の比を次のように与える。

$$\hat{x}_1 : \hat{x}_2 : \hat{x}_3 = k_1 \frac{n_1}{J} : k_2 \frac{n_2}{J} : k_3 \frac{n_3}{J} \quad (8)$$

ここで n_i/J はユーザ数に応じた比例配分を表し、 k_i は効用関数の指数係数であり、待ち時間に対する許容値が小さくなるアプリケーションでは k_i が大きくなって、多くのタイムスロットが割当てられることになる。すなわち、そのアプリケーションの利用を早く終了させる。このとき、ア

表1 シミュレーション諸元

周波数帯	5.2GHz
伝送帯域幅	12MHz
無線通信路	AWGN
受信 CN 比	7~27[dB]
スポットサイズ	半径 50m
誤り訂正符号	畳み込み符号 拘束長=7 符号化率=1/2
再送制御	Stop and Wait ARQ
下り多重方式	Dynamic TDM
フレーム長	10[msec]
ユーザの要求間隔	指数分布 (平均 20[sec])
ユーザ数	50 (スポット内に一様分布)
データサイズ	対数正規分布 ($\mu=13, \sigma=1.3$)

アプリケーション i を利用する j 番目のユーザに割当てられるタイムスロット数 x_{ji} は、グループ内では公平に分配されて

$$x_{ji} = \frac{k_i}{k_1 n_1 + k_2 n_2 + k_3 n_3} X \quad (j=1, 2, \dots, J) \quad (9)$$

となる。

3.3 シミュレーション諸元

本稿では、1 つのスポット内で複数のユーザがデータダウンロードサービスを利用する場合の待ち時間とユーザ効用の MOS 値について計算機シミュレーションにより評価を行った。ユーザが利用できるデータダウンロードサービスは待ち時間が通知されるフォアグラウンドタスク、待ち時間が通知されないフォアグラウンドタスク、バックグラウンドタスクの 3 つとし、ユーザは各アプリケーションを等しい確率で利用するものとした。また、簡単のため無線リンクで要する待ち時間のみを考慮した。本シミュレーションでは、サービススポットを基地局を中心とする円形とした。スポット内には 50 人のユーザが面積当たり一様に存在し、各々が独立な指数分布に従う時間間隔でデータを要求するものとした。ただし、ユーザはダウンロード中のデータ受信が完了するまで次のデータを要求できないものとした。また、同時に利用できるデータダウンロードサービスは 1 つまでとした。なお、データサイズは対数正規分布に従うものとした [6]。また、無線通信路は AWGN を仮定し、各々のユーザの受信 CN 比を基地局からの距離減衰を考慮して

27[dB] から 7[dB] まで変化させた。無線伝送モードは IEEE802.11a および 11g の規格に準拠し、変調方式は QPSK とした。また、符号化率は 1/2、1 シンボル当たりのビット数は 2 ビット、周波数利用効率率は 1 [bps/Hz]、伝送レートは 12 [Mbps] とした。表 1 にシミュレーション諸元を示す。

3.4 シミュレーション結果

図 3 より明らかなように、ユーザ効用の値が 0.6 以上であればユーザは不満を持たないといえる。そこで本稿では、各サービスに対するユーザ効用が 0.6 以上となる確率について評価する。また、各ユーザのユーザ効用の評価は、ユーザが待ち時間が通知されるフォアグラウンドタスクを利用する場合は式 (2)、待ち時間が通知されないフォアグラウンドタスクを利用する場合は式 (3)、バックグラウンドタスクを利用する場合は式 (4) を用い、コンテンツの取得に要した時間からユーザ効用を算出する。

ユーザ効用を考慮した提案方式によりタイムスロットを割当てた結果、それぞれのタスクに対するユーザ効用が 0.6 以上となる確率を図 7 に示す。待ち時間が通知されるフォアグラウンドタスクを Web-F、待ち時間が通知されないフォアグラウンドタスクを FTP-F、バックグラウンドタスクを FTP-B、フォアグラウンドタスクの平均を F-Ave. とした。また、縦軸は確率である。同図には比較のためユーザ効用を考慮せずユーザ毎に均等にタイムスロットを割当てる従来方式の結果を示す。

図 7 から明らかなように、従来方式ではユーザ効用が 0.6 以上となる確率は待ち時間が通知されるフォアグラウンドタスクを利用する場合は最も低く、バックグラウンドタスクを利用する場合は最も高くなっている。一方、提案方式ではアプリケーションによらずほぼ同一の確率となっており、アプリケーション毎のユーザ効用を等しくするという目的を達成できている。これは、待ち時間の増大に対するユーザ効用の低下の度合いが大きいアプリケーションに、より多くのタイムスロットを割当てているからである。

また、フォアグラウンドタスクの平均が上昇していることから待ち時間に対するユーザの注意が向けられているアプリケーションに対してより多くのリソースを割当てることでユーザ効用の向上が実現できていることが確認できる。

4. あとがき

本稿では、ユーザがデータダウンロードサービスを利用する場合に、ユーザのアプリケーション利用状況によって異なる待ち時間に対するユーザ効用の違いに着目して、主観評価実験から効用関数を導き出し、それらの利用状況による違いについて検討した。その結果、ユーザのアプリケーション利用状況によって待ち時間に対するユーザ効用が異なることが明らかとなった。さらに、主観評価実験により得られた複数の効用関数を用いたユーザ効用に基づく無線リソースマネジメントを提案し、ユーザのアプリケーション利用状況に対応した複数の効用関数を用いてタイムスロ

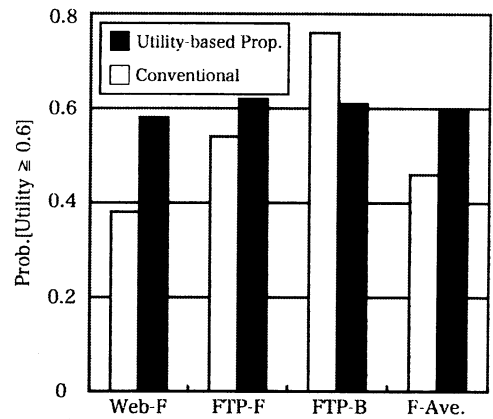


図 7 ユーザ効用が 0.6 以上となる確率

ト割当てを行うことで、異なるアプリケーションを利用するユーザのユーザ効用を等しくできることを計算機シミュレーションにより示した。今後は、動画像における画質など待ち時間以外のサービス品質に対するユーザ効用の測定や効用関数とデータサイズの両方を考慮したスロット割当てアルゴリズムの提案等を行なう必要がある。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金基盤研究 (B)14350202 の補助によるものである。また、主観評価実験に際し御協力頂いた多数の被験者各位に感謝申し上げる。

文献

- [1] 小牧省三他, “無線 LAN とユビキタスネットワーク,” pp.280-294, 丸善株式会社, 2004.
- [2] T. Kaji, Y. Minoda, K. Tsukamoto, S. Komaki, “Radio Agent Realizing User Utility-based Resource Allocation in Wireless Spot Access,” Proc. of ISCT 2004, pp.286-289, Sapporo, Japan, Oct. 2004.
- [3] 矢守恭子, 田中良明, “優先制御によるデータ転送のユーザ効用最大化,” 信学論 (B), vol.J86-B, no.10, pp.2041-2052, Oct. 2003.
- [4] K. Nomura, K. Yamori, E. Takahashi, T. Miyoshi, and Y. Tanaka, “Waiting Time versus Utility to Download Images,” APSITT2001, pp.128-132, Kathmandu, Nepal / Atami, Japan, Nov. 2001.
- [5] “Method for the subjective assessment of the quality of television pictures,” International Telecommunication Union Radiocommunication Sector, ITU-R Recommendation 500-10, Mar. 2000.
- [6] 名部正彦, 馬場健一, 村田正幸, 宮原秀夫, “インターネット・アクセスネットワーク設計のための WWW トラフィックの分析とモデル化,” 信学論 B, vol.J80-B-1, no.6, pp.428-437, June 1997.