

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 9 日現在

機関番号：35403

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H03236

研究課題名（和文）ユーザコンテキスト適応型ネットワーク設計・制御手法の確立

研究課題名（英文）User context aware network design and control method

研究代表者

林 孝典（Hayashi, Takanori）

広島工業大学・情報学部・教授

研究者番号：60539641

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究プロジェクトでは、情報通信サービスに対するユーザ個々の嗜好や心理状態等を反映可能なユーザ体感品質（QoE）評価手法と、QoE指標に基づく新たなネットワーク設計・制御手法を開発した。前者では映像配信を対象に、ユーザ毎の画質感度に着目したQoE評価モデルや、映像視聴中の快さを生体指標から推定する手法を提案した。後者ではWeb閲覧や映像配信を対象に、QoEの公平性を確保する無線LANプロトコルの拡張やQoEを最大化するリアルタイム制御方式を提案し、シミュレーション実験によりその有効性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、QoE評価の心理的・生理的計測とネットワーク設計・制御という、異なる学問・技術分野を融合した成果を訴求することができた。さらに、認知心理学・認知神経科学と通信ネットワーク工学との融合研究という新たな学問分野を開拓できた点でも学術的に意義深い。また、価値観の多様化が進む社会では、今後の情報通信サービスにおいてもユーザー一人ひとりのニーズに応えられるネットワークの実現が求められ、本研究成果はQoEの観点でこれを実現する新たなネットワーク設計・制御手法を提案しており、社会的にも意義が大きい。

研究成果の概要（英文）：This research project had developed quality of experience (QoE) evaluation methods that can reflect individual user preferences or psychological states for information and communication services, and novel network design and control methods based on the QoE index. In the former, a QoE evaluation model focusing on the video quality sensitivity of each user and a method of estimating the pleasure during video viewing from biometric indexes were proposed for video streaming services. In the latter, the extension of the wireless LAN protocol that ensures the fairness of QoE and the real-time control method that maximizes QoE were proposed for Web browsing and video streaming services, and their effectiveness was shown by simulation experiments.

研究分野：通信工学

キーワード：QoE 主観評価 生体情報 ネットワーク設計 ネットワーク制御

### 1. 研究開始当初の背景

情報通信サービスを快適な品質で実現するため、ユーザが体感する品質 (QoE: Quality of Experience) に基づいたネットワーク設計・制御が求められている。従来の検討では、多数のユーザが知覚する“平均的な”品質評価特性に基づいたネットワーク設計や、スループット/遅延時間等のネットワーク性能指標に基づいたネットワーク制御が主であり、“ユーザーひとり”には最適化されていない。サービスやユーザの価値観の多様化が進む中、今後の情報通信サービスはユーザ個々の品質の捉え方に応えていくことの必要性が増してきている。

### 2. 研究の目的

本研究では、ユーザのサービス利用目的・環境や、嗜好・心理状態等のコンテキストに適応する新たなネットワーク設計・制御手法を提案し、ユーザー一人ひとりの QoE を最大化するための基盤技術の具現化とその効果検証を実施する。具体的には、主要通信サービスである Web や映像配信を対象に、ユーザ個々の QoE の違いを考慮可能な新たな QoE 評価指標に落とし込むことでネットワーク品質設計に反映させる。また、心拍変動等の生体情報を用いてコンテキスト情報を詳細に把握する手法や、QoE 最大化に向けて適応的にネットワーク品質を制御可能な方法論を確立し、その有効性を検証する。

### 3. 研究の方法

#### (1) ユーザ属性を考慮した QoE 推定モデルに基づくネットワーク帯域設計

映像配信サービスを対象にユーザコンテキストを反映可能な QoE 推定モデルを構築するため、インターネットを通じて不特定多数の人々に業務を依頼する「クラウドソーシング」により、様々な符号化ビットレートで配信された映像に対する主観品質評価実験を実施した。評価者の属性として、性別、年齢、映像を観視するデバイス種別の違いを考慮した。クラウドソーシングを用いた主観品質評価では、取得した評価データの信憑性が低くなることが懸念されるため、信憑性が低いと考えられる評価データをスクリーニングした後、配信映像に要求される符号化ビットレートの評価特性を分析した。その中で、各評価者属性の平均品質評価特性だけでなく、個々の評価者の品質評価感度の違いに着目してクラスタリング分析も実施した。その結果得られた QoE 推定モデルに基づき、実現される映像品質をある一定以上に保つためのネットワーク帯域設計法の有効性を検討した。

#### (2) 生体情報計測による QoE 評価指標の推定

映像配信サービスを対象として、コンテンツに対する QoE を評価者の生体情報から推定することを目指し、QoE を推定するために必要な生体情報及びその生体情報から QoE を推定する手法について検討した。内容が異なる動画像に対して、解像度の低下や再生停止などネットワーク品質低下を想定した品質劣化映像を実験刺激とした。まず、QoE を視聴した動画像に対する総合的な満足度とし、5 件法により定量化した。また、生体情報から満足度を直接推定するのではなく、満足度は情動の影響を受けることを考慮し、生体情報から推定された情動を経由して満足度を推定する手法を検討した。ここで、生体情報は、脳波、心拍及び視線を取得し、情動については、ラッセルの円環モデルにより、valence と arousal の 2 軸で評価した。

#### (3) QoE の公平性を改善するためのネットワーク制御

各ユーザの QoE は高ければ高い程良いが、ネットワーク資源が有限な環境では、あるユーザの QoE の向上は他のユーザの QoE を低下させることを意味する。従って、QoE を考慮したネットワーク制御には、QoE を向上させるだけでなく、全てのユーザに公平に満足度の高い通信サービスを提供することが望まれる。このような観点から、本研究では、QoE が正しく推定されているという前提で、推定した QoE に基づいたネットワーク制御の提案及び提案したネットワーク制御による QoE の公平性改善効果について評価した。具体的には、IEEE802.11 無線 LAN 環境でユーザがファイルをダウンロードする場合の QoE に注目し、IEEE802.11 において QoS に応じた優先制御が可能である IEEE802.11e MAC プロトコルを用いて QoE の公平性を改善するための手法を提案した。

#### (4) フィードバック制御理論によるネットワーク制御

映像配信及び Web ブラウジングにおけるユーザの QoE 向上を目指し、制御理論的アプローチに基づいて通信品質を制御する手法を検討した。代表的な映像配信技術である MPEG-DASH (Moving Picture Experts Group Dynamic Adaptive Streaming over Hypertext Transfer Protocol) では、適応ビットレート (ABR: Adaptive Bitrate) 制御が利用されている。ABR 制御では、ネットワークスループットに応じて適応的に映像ビットレートを変化させることにより再生映像の QoE を一定レベルに維持している。本研究では、ユーザ端末内の再生バッファレベルを一定レベルに維持するように映像ビットレートを制御するシステムモデルをシミュレータ上

に構築し、フィードバック制御に基づいて QoE を改善するための制御系設計を行った。映像配信における QoE は、ビットレートの大きさ、ビットレートの変動、再生停止時間の 3 要素に大きく影響を受けるため、これらを組み合わせた QoE 指標を用いて評価を行った。また、Web ブラウジングにおける表示待ち時間を QoE フィードバックに基づき制御し、目標 QoE を達成するネットワーク帯域制御法を検討した。さらに、映像配信及び Web ブラウジングにおいて QoE には個人差や周辺環境からの影響が存在するため、それらをモデル化誤差として扱い、外乱としてシステムに入力させて QoE 評価を行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) ユーザ属性を考慮した QoE 推定モデルに基づくネットワーク帯域設計

最初に、インターネットを用いたクラウドソーシングにより取得した評価データには信憑性が疑われるデータが存在していることを示し、評価者全体の品質評価値の平均値と各評価者の品質評価値の相関係数が 0.1 未満のデータをスクリーニングすることで、条件毎の品質評価値に変化がほとんど見られない評価者や全体の評価傾向と反対の評価者を除外し、評価感度を高めたデータが得られることを確認した。次に、様々な符号化ビットレートで配信された映像に対する主観品質評価結果を、性別、年齢層、映像を観視するデバイス種別の違いで分析した結果、35~49 歳のスマホユーザの評価値が 20~34 歳のノート PC ユーザの評価値よりも統計的に有意に高いことが確認された。さらにこれらの各属性内の品質評価感度の強弱で評価者をクラスタリングすると、「品質に厳しい 20~34 歳のノート PC 利用者」と「品質に寛容な 35~49 歳のスマートフォン利用者」が快適な品質(平均オピニオン評点(MOS: Mean Opinion Score)が 3.5 以上)と評価する最低符号化ビットレートはそれぞれ約 3Mbps、約 1Mbps となり、平均的な品質評価特性でネットワーク帯域設計するよりもユーザ毎の QoE を高められることを確認した。

##### (2) 生体情報計測による QoE 評価指標の推定

まず、情動と満足度の関係の検討では、評価者や動画の内容とは無関係に、満足度の評価に基づき、動画視聴中のラッセルの円環モデル上での平均座標を求めた。その結果、満足度の評価が高いほど、valence(快-不快)が高くなる傾向を確認した。つまり、満足度が高いほど評価者が快いと感じていた。次に、生体情報とラッセルの円環モデル上での座標との関係の検討では、再帰的ニューラルネットワーク(RNN)を用いて検討した。心拍から得られるパラメータを入力とし、2次元平面上での座標の推定を行なったところ、推定精度はデータに依存することが確認できた。従来の研究において心拍から得られるパラメータは arousal(覚醒-鎮静)軸とはよく対応するが、valence 軸との対応は良くないとも言われている。そのため、動画視聴中の心拍に加えて、脳波と視線を同時に計測できるシステムを構築してデータを取得した。これらの生体情報で特に脳波は、valence 軸と対応することも指摘されており、脳波も含めた複数の生体情報を組み合わせた情動の推定技術を検討する基盤が構築できた。

##### (3) QoE の公平性を改善するためのネットワーク制御

Web ブラウジングの表示待ち時間に対する QoE 特性に関する研究はこれまで多く行われており、表示待ち時間から MOS を推定する客観品質評価モデルについても既にいくつかの提案がある。本研究ではそれらの中で、MOS が表示待ち時間に対して指数関数により減少するモデルを用いた。IEEE802.11e MAC プロトコルでは、パケットを所要の QoS に応じて異なる複数の仮想バッファに振り分け、それらのバッファに異なる制御パラメータを割り当てることによって優先制御を実現している。提案手法ではこの仕組みに注目し、QoE の公平性を改善する手法を実現した。具体的には、QoE に応じてユーザを複数のクラスに分類し、各クラスに対して IEEE802.11e の仮想バッファを割り当てる。IEEE802.11e には優先制御のための複数のパラメータがあるが、本研究ではそれらの中から最小衝突ウィンドウを公平性改善のための制御パラメータとして選択し、クラス毎に異なる最小衝突ウィンドウを割り当てた。IEEE802.11e および TCP/IP を実装したシミュレーション実験により 2 つのクラスが存在する環境で提案手法の性能評価を行った。シミュレーションの結果、提案手法により MOS の分布が提案手法を用いない場合よりも両クラス間で近づいており、QoE の公平性が改善されることを確認した。

##### (4) フィードバック制御理論によるネットワーク制御

映像配信サービスにおける QoE を考慮した ABR 技術の検討では、ビットレートの変動により QoE が劣化することに着目し、PD (Proportional-Derivative) 制御により再生バッファのバッファオーバーフローおよびアンダーフローを回避しつつ、制御入力である要求ビットレートの変動を抑制する制御アルゴリズムを提案した。再生バッファレベルがバッファ上限ないし下限付近では PD 制御によりビットレート変動を許容してバッファレベルを安定化させる。一方で、再生バッファレベルがバッファ長の 1/2 程度の場合にはビットレート変動を抑制するために PD 制御を行わない。シミュレーションにより、提案手法を用いることで、従来の PD 制御単独の場合と比較して QoE が向上することを確認した。また、Web ブラウジングにおける表示待ち時間制御法の検討では、QoE 情報をリアルタイムにネットワーク帯域制御にフィードバックし、目標 QoE を実現する制御アーキテクチャを提案した。目標 QoE とユーザからフィードバックされる QoE との誤差に基づいて PD 制御を行うとともに、ダウンロード速度やファイルサイズ等に関するシス

テムのモデル化誤差を補償するために外乱オブザーバを用いた。シミュレーションにより、提案手法を用いることで、モデル化誤差が存在する環境下でも目標 QoE が実現できることを確認した。さらに、複数ユーザが存在する場合のユーザ間公平性についても初期検討を行い、ネットワーク帯域制御のフィージビリティを確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Ryuta Sakamoto, Takahiro Shobudani, Ryosuke Hotchi, and Ryogo Kubo	4. 巻 vol. E104-B, no. 3
2. 論文標題 QoE-Aware Stable Adaptive Video Streaming Using Proportional-Derivative Controller for MPEG-DASH	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Communications	6. 最初と最後の頁 286-294
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transcom.2020EBP3038	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計29件（うち招待講演 9件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 田島佳祐, 阪本竜太, 堀地亮佑, 松田崇弘, 久保亮吾
2. 発表標題 WebブラウジングにおけるQoE変動を考慮した待ち時間制御
3. 学会等名 電子情報通信学会 ソサイエティ大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kosuke Shikama, Takahiro Matsuda, Takefumi Hiraguri, Takanori Hayashi, and Ryo Yamamoto
2. 発表標題 Improving QoE Fairness Using the IEEE 802.11e Priority Control Mechanism
3. 学会等名 2020 IEEE International Conference on Consumer Electronics - Taiwan
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大田健紘, 平栗健史, 吉野秀明
2. 発表標題 映像コンテンツ視聴時の生体情報に基づくユーザの知覚感情の推定に関する研究
3. 学会等名 電子情報通信学会 CQ研究会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	久保 亮吾  (Kubo Ryogo)  (00582199)	慶應義塾大学・理工学部(矢上)・准教授   (32612)	
研究 分担者	松田 崇弘  (Matsuda Takahiro)  (50314381)	東京都立大学・システムデザイン研究科・教授   (22604)	
研究 分担者	大田 健紘  (Ota Kenko)  (50511911)	日本工業大学・基幹工学部・助教   (32407)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------