

令和 2 年 5 月 17 日現在

機関番号：73905

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06454

研究課題名(和文) マルチメディア通信QoE推定・予測のためのベイズ的方法論の枠組み構築

研究課題名(英文) Framework Establishment of Bayesian Methodologies for QoE Estimation and Prediction in Multimedia Communications

研究代表者

田坂 修二 (Tasaka, Shuji)

公益財団法人名古屋産業科学研究所・研究部・研究員

研究者番号：80110261

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：マルチメディア通信におけるQoE(Quality of Experience: ユーザ体感品質)を、技術的及び非技術的要因を考慮して推定・予測するベイズ的方法論の枠組み構築を目指した。

まず、音声・ビデオ通信における単一QoE尺度ベイズ統計回帰モデルと、力覚・音声・ビデオ(三感)通信における3構成概念(AVQ, HQ, UXQ)を持つベイズ構造方程式モデルを構築した。更に、3構成概念が相関関係しか持たないモデルと因果関係を持つモデルとを比較し、因果関係モデルの方が統計的に適切であることを示した。また、三感通信において、単一QoE尺度ベイズネットワークとベイズ統計モデルとを比較した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

QoEは、ユーザまで含めたマルチメディア通信システムにおける真の意味でのエンドツーエンド評価基準である。QoEへの影響要因を組織的・定量的に評価できる数理的手法は、システム的设计・運用に極めて有用であるとともに、高度情報通信システムの学術体系化に不可欠である。特に、力覚・音声・ビデオ通信は有望な次世代通信であり、そのQoE数理モデル構築の意義は大きい。現在の高度情報ネットワーク社会では、技術のみが大きく先行し、ユーザまでも含めた情報環境アセスメントが不十分である。技術的視点のみでは解明できない種々の問題(ネット中毒など)が生じている。本研究は、これらの問題解決のための指針となりうる。

研究成果の概要(英文)：This project aims at establishing a framework of Bayesian methodologies for estimating and predicting QoE (Quality of Experience) in multimedia communications.

We have first built Bayesian hierarchical regression models for a scalar QoE measure in audiovisual communications. We have next studied haptic audiovisual communications by means of Bayesian structural equation modeling (SEM); three constructs (Audiovisual, Haptic and Use experience quality) have been introduced to aggregate multidimensional QoE measures and examine causation between constructs. The SEM model with the three constructs is compared with two confirmatory factor analysis models each with the three constructs or a single one, both of which have only correlation. The comparison indicates that causation is more plausible than only correlation in a statistical sense. In addition, we have formulated a Bayesian network model of a scalar QoE measure and compared a corresponding Bayesian statistical model.

研究分野：工学

キーワード：マルチメディア通信 QoE ユーザ体感品質 ベイズ統計モデル ベイズネットワーク インターネット高度化

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

QoE(Quality of Experience: ユーザ体感品質)は、情報通信サービスのユーザが感じる主観的な品質であり、サービス提供の最終目標と言える。そのため、近年、学会のみならず産業界においても QoE の向上・最適化手法の確立が望まれていた。

QoE は、ネットワークの QoS (Quality of Service: サービス品質)という技術的要因のみならず、他の多くの要因の影響を受ける。このため、QoE の評価尺度は本質的に多次元になる。QoE 定量評価(推定・予測)においては、これら多くの影響要因による状況依存性と多次元性をいかにモデル化するかが鍵となる。これは、従来の工学的手法に人文・社会科学的手法を融合した新たなアプローチの必要性を意味する。

QoE 向上・最適化は、QoE 制御によって実現される。その制御には、QoS のみならず、ユーザ自身やサービスの使用環境情報とサービス仕様とを反映させた QoE モデルの構築が必須となる。これにより、QoE の定量的推定・予測が可能となる。

しかしながら、実際の QoE 評価において用いられているモデルの多くは、ITU 勧告にある MOS (Mean Opinion Score)を尺度とした伝統的なものである。これは、元々は電話品質と放送用テレビ品質の評価のために定義されたものである。被験者が評価対象の良し悪しについて与えた評点(例えば 1~5)の単純な算術平均(各評点をその生起確率の近似値である相対度数で重み付けして加算)である。

その簡便さのため、多次元尺度の各々に個別に MOS を適用し、伝統的な統計的推測法(最尤法による母数推定や仮説検定)によって QoE が評価されるのが普通であった。この方法は MOS の個別適用であるため、状況依存性を考慮した多次元 QoE の定量的評価はできず、多次元 QoE の構造化は無理であった。そのため、現在のマルチメディア IP 通信環境への適用には限界があった。

このような問題意識の下で、QoE の多次元的な特徴を明示的に扱っている研究は、本研究開始当時でも既にいくつも見られた。EU の研究プロジェクト QUALINET(COST Action)、同 QuEEN(Celti-Plus)、イリノイ大学(ACM Multimedia2009)、オタワ大学(EuroHaptics2008、ACM Trans. Multimedia Comput., Commun. and Appl., April 2014)などである。また、QoE 状況依存性の研究は、上述の国外機関等に加え、国内でも NTT、新潟大、芝浦工大、NICT、早稲田大、KDDI などで音声・ビデオ・Web を対象として行われていた。しかし、これら従来研究には、多次元的な扱いには制約があるとともに、伝統的な統計的推測法に基礎を置いているため、適用範囲も限られていた。

一方、高度情報ネットワーク社会は、利便性のみならず、懸念すべき副作用(ネット依存、歩きスマホなど)も生じている。QoE を単なるユーザ満足度ではなく、情報通信がもたらす正負両面の多次元評価尺度と捉えねばならない。どのような要因(特に非技術的)が QoE にいかなる影響を及ぼすかを定量的に評価できる手法が要る。これには、従来とは異なる方法論が必須である。

研究代表者は、平成 25 年 4 月に、前回の科研費基盤研究(C)(平成 25~27 年度)を開始するに際して、問題解決に適した方法論の調査と考察に専念し、約 1 年後に、ベイズ統計学(Bayesian Statistics: BS)にたどり着いた。ベイズ統計学の利点は、影響要因を条件として明示的に表現した上で、QoE 評点生起の事後確率分布を求めることができる点にある(MOS における相対度数は、点推定であるとともに条件明示もできない)。しかも、現在では事後確率分布を容易に計算できるツールも存在する。

ベイズ統計解析法は、1990 年代後半から急速に普及し、いまや、医療統計、生物統計、計量経

済学，心理学，画像処理などの分野で広範囲に使われている．ところが，種々の文献・データベースを検索しても，QoE ベイズ統計モデルの研究は見つけれなかった．

更に，ベイズの定理に基礎を置く手法ということでは，人工知能における確率的推論法の一つであるベイジアンネットワーク(Bayesian Network: BN)を QoE 評価に用いる研究が，2015 年前後からいくつか見られるようになった(IEEE Trans. Mobile Computing, May 2015 など)．ベイジアンネットワークでは，その名とは裏腹に，確率計算は必ずしもベイズ的ではない．しかし，確率変数の依存関係をグラフ表現するなど，ベイズ統計学にはない利点もあるよう思える．ところが，QoE 評価の観点から BN とベイズ統計学(BS)の長短を比較した研究はこれまでに見られなかった．このような比較研究を行えば，両者の併用により，強力な QoE 評価手法を創出できる可能性があると考えられた．

そこで，研究代表者は，まず，QoE ベイズ統計モデルを，医療統計などのモデルを参考にして，自分で構築することにした．幸いにも平成 26 年(2014 年)夏に，一つの単一 QoE 尺度モデルが完成したので，その成果を翌年(2015 年)6 月にロンドンで開催された IEEE ICC(International Conference on Communications)で発表した．これが，世界初の QoE ベイズ統計モデルとなった．続いて，2016 年には，多次元 QoE 尺度のベイズ構造方程式モデル(Structural Equation Model: SEM)を構築して，5 月にクアラルンプールで開催された ICC2016 で発表した．これは多次元 QoE のベイズ統計モデルとして世界初のものである．

上記のように，QoE へのベイズの方法論の適用は有望であると予想されるにもかかわらず，本研究開始当時には，ベイズ統計モデルは研究代表者の研究以外には見られなく，多くの解決すべき課題があった．更には，QoE のベイズ統計(BS)モデルとベイジアンネットワーク(BN)モデルとの関係も明らかにされていなかった．本研究は，これらの課題に取り組んだものである．

2．研究の目的

マルチメディア通信におけるQoEを，技術的要因のみならずユーザ属性などの非技術的要因をも考慮して推定・予測するベイズ的方法論の枠組みを構築する．

目標は，次の 4 点である．

- (1) 単一QoE尺度ベイズ統計回帰モデルの枠組み完成(音声・ビデオ通信)．
- (2) 多次元QoE尺度ベイズ構造方程式モデルの枠組み完成(力覚・音声・ビデオ通信)．
- (3) ユーザ属性や影響要因からQoEへの因果効果の解明と因果推論．
- (4) 単一QoE尺度ベイジアンネットワークの構築とベイズ統計モデルとの比較(力覚・音声・ビデオ通信)．

3．研究の方法

QoE のベイズ統計モデリングを中心に，研究目的に記載の 4 項目(1)～(4)を，3 年間で研究した．

モデリングには，多数の被験者による主観評価測定データが必要である．このために必要なデータには，過去の科研費研究で取得したものを利用した．本研究では，基本的には，新たな主観評価実験は行わず，数理モデルの構築と妥当性検証に専念した．妥当なモデル構築が困難な場合は，原因の明確化とともに，可能な解決策の提示を試みた．

前記 4 項目の研究実施の流れと実施年度との関係を図 1 示す．

項目(1)～(3)は、各年度に1項目を研究した。項目(4)については、項目(1)～(3)の研究結果を参考にしつつ、3年間にわたって研究を行った。最終年度には、4項目の成果を取りまとめで、枠組みを完成した。

ベイズ統計解析における事後確率分布の計算には、フリーソフト OpenBUGS を用いて MCMC (Markov chain Monte Carlo) シミュレーションを行った。

本研究では、QoE の多次元性が顕著に現れるシステムとして、力覚・音声・ビデオの三感通信を取り上げた。研究代表者は、以前の科研費により、ネットワークを介して遠隔地にある物体の操作が可能な力覚・音声・ビデオ通信実験システムを構築し、既にいくつかの主観評価データ(5段階評点)を取得済みであった。前述の ICC2016 論文は、この主観評価データを用いたものである。

4. 研究成果

前記“研究の目的”に記載の4項目(1)～(4)に加えて、(5)力覚・音声・ビデオ通信におけるユーザ支援型 QoS 制御による QoE 向上方式の実験データ取得も行った。これらの成果を、以下、順に記す。

(1) 音声・ビデオ通信における単一QoE尺度ベイズ統計回帰モデルの枠組み完成。

ICC2015 論文をさらに発展させ、単一 QoE 尺度(満足度)を用いた音声・ビデオインタラクティブ通信のベイズ階層回帰モデルを完成した。MCMC シミュレーション手法を用いて、QoE の推定と予測を行った。その結果、対象とした被験者集団(男女大学生)では性別が QoE に大きく影響することが分かった。更に、モデル比較、選択した事前確率分布が推定精度に及ぼす影響を調べるとともに、モデルの予測精度の検証を事後予測 p 値(Posterior Predictive p-value)による leave-one-out cross validation で行い、モデルの妥当性を立証した。これらの研究結果は、マルチメディア通信 QoE のベイズ統計回帰モデルの基礎を築いたと考える。この研究内容は、IEEE Transactions on Multimedia 2017 年 6 月号に掲載された。

(2) 力覚・音声・ビデオ通信における多次元QoE尺度ベイズ構造方程式モデルの枠組み完成。

本項目の出発点となった ICC2016 論文では、13 種類の主観評価 5 段階評点と 1 種類の客観評価尺度(作業効率)値を正規分布で近似した。モデル化のために、構造方程式モデル(SEM)を利用した。MCMC シミュレーションには、商用ソフトウェア Amos を用いた。しかし、5 段階評点の QoE 尺度は正規分布の仮定を満足しないため、高精度の最尤 SEM の構築は困難である。また、Amos では、独自に構築したモデルの詳細を反映させることは容易ではない。

そこで、本研究では、各 QoE 尺度の評点(カテゴリカル変数)に対応する正規分布の潜在変数(latent variable)を導入し、それらを 3 種の構成概念(construct)、すなわち、音声ビデオ品質(AVQ)、力覚品質(HQ)、ユーザエクスペリアンス品質(UXQ)に集約させたベイズ SEM を構築し、

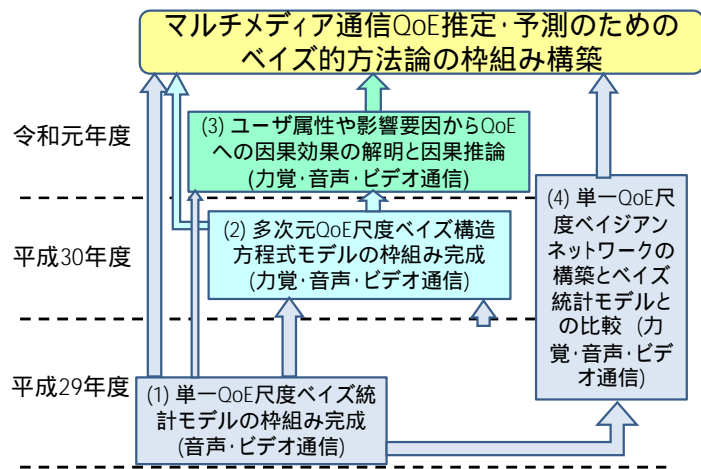


図1. 各項目の研究実施の流れと実施年度

OpenBUGS による MCMC シミュレーションを行った。“オブジェクト移動”と“カスタネット叩き”の二つの作業を対象とした。構成概念(因子)の識別可能性(identifiability)問題に焦点を合わせて、単位負荷係数法(unit loading)と単位分散法(unit variance)とを用いてモデルを解析した。“オブジェクト移動作業”の成果については、IEEE ICC2019 で発表した。

(3) ユーザ属性や影響要因からQoEへの因果効果の解明と因果推論。

前記(2)で構築したカテゴリカルデータベイズSEMの研究を基にして、QoEの三つの構成概念(因子)間の相関関係モデルと因果関係モデルとを構築して比較した。3構成概念(AVQ, HQ, UXQ)が相互に相関関係しか持たない(因果関係はない)モデル3C-CFA(3 Construct Confirmatory Factor Analysis)と、3構成概念が1個に縮退したモデル1C-CFAとを、3個の構成概念が因果関係を持つモデル3C-SEMと比較した。合理的な比較を行うために、外生変数の構成概念は標準正規分布をずらすとして、構成概念からスコア潜在変数への負荷係数と構成概念間の回帰係数とを正規化した。その結果、因果関係モデル3C-SEMが、相関関係モデル3C-CFA及び1C-CFAより統計的に適切であることを明らかにすることができた。これは、力覚・音声・ビデオ通信における因果関係と相関関係とを定量的にモデル化した世界初の研究となった。この成果は、2020年2月、ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications and Applications に掲載された。なお、ユーザ属性とQoEとの因果関係は、項目(1)で初歩的な議論をしたものの、本格的な取り組みは、今後の課題として残された。

(4) 力覚・音声・ビデオ通信における単一QoE尺度ベイジアンネットワークの構築とベイズ統計モデルとの比較。

従来研究とは異なり、ユーティリティノードを用いないベイジアンネットワーク(BN)を構築して、前記(1)の研究で得られた方法によるBSモデルと比較した。その結果、両モデルは同等のQoE推定精度を与えることが分かった。しかし、QoE予測については、ランダム効果項を持つBS階層回帰モデルがBNモデルよりも優れていることが明らかになった。これは、一つのケーススタディではあるが、同じ対象をBNとBSの両方でモデル化・比較した初めての研究である。この成果は、SN Applied Sciences, Springer Natureに掲載された。

(5)力覚・音声・ビデオ通信におけるユーザ支援型 QoS 制御による QoE 向上方式の実験データ取得。

本項目は、当初の実実施計画にはなかったが、“QoE 因果効果の解明と因果推論”の数理モデル構築のための追加データとして取得した。令和元年度に研究分担者となった布目敏郎准教授との共同研究の成果であり、電子情報通信学会英文論文誌に採録された。

項目(2)で扱った力覚・音声・ビデオインタラクティブ通信システムに、受信側プレイアウトバッファリング時間をユーザの好みに合うように調整可能とするメカニズムを導入したものである。グラフィカルユーザインタフェース(GUI)によって、ユーザは受信側プレイアウトバッファリング時間を容易に操作することができる。このメカニズムの有無による QoE の差や、ユーザの GUI 操作行動の違いのデータを、実験により収集した。データを統計的に解析した結果、GUI 操作行動はユーザ属性に大きく影響されることが分かった。

この項目は、今回の科研費研究では数理モデル化の段階までは進展しなかった。機会があれば QoE ベイズモデリング法の拡張の課題として取り上げたいと考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 5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 Shuji Tasaka	4. 巻 1
2. 論文標題 Comparison of multimedia communications QoE models by Bayesian networks and Bayesian statistics: a case study	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 SN Applied Sciences, Springer Nature	6. 最初と最後の頁 1~20
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s42452-019-0983-5	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 -
1. 著者名 Shuji Tasaka	4. 巻 16
2. 論文標題 Causal Structures of Multidimensional QoE in Haptic-Audiovisual Communications: Bayesian Modeling	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications	6. 最初と最後の頁 1~23
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1145/3375922	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 NUNOME Toshiro, KAEDE Suguru, TASAKA Shuji	4. 巻 E103-B
2. 論文標題 User-Assisted QoS Control for QoE Enhancement in Audiovisual and Haptic Interactive IP Communications	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Communications	6. 最初と最後の頁 1~10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transcom.2019EBP3235	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 -
1. 著者名 Shuji Tasaka	4. 巻 1
2. 論文標題 Bayesian categorical modeling of multidimensional QoE in haptic audiovisual communications	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of IEEE International Conference on Communications	6. 最初と最後の頁 1,7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ICC.2019.8761784	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 -

1. 著者名 布目敏郎, 楓卓, 田坂修二	4. 巻 CQ2019-2
2. 論文標題 音声・ビデオ・力覚メディアインタラクティブIP 通信におけるユーザ援用型QoS制御のための自動制御アルゴリズム	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電子情報通信学会技術研究報告	6. 最初と最後の頁 7, 12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 Shuji Tasaka	4. 巻 19
2. 論文標題 Bayesian hierarchical regression models for QoE estimation and prediction in audiovisual communications	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Multimedia	6. 最初と最後の頁 1195, 1208
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMM.2017.2652064	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0件

〔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	布目 敏郎	名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授	2019年度追加
	(Nunome Toshiro)		
	(10345944)	(13903)	