

令和 5 年 6 月 18 日現在

機関番号：73905

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04495

研究課題名(和文) マルチメディア通信QoEにおける統計的因果推論法の枠組み構築

研究課題名(英文) Framework Establishment of Methodologies for Statistical Causal Inference in  
Multimedia Communications QoE

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) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：インターネット上でのマルチメディア通信QoE (Quality of Experience: ユーザ体感品質)における因果関係を、ベイズ統計法により推論する方法論の枠組みを構築する。次世代の通信サービスとして有望である力覚・音声・ビデオ通信を主たる研究対象とする。  
まず、多次元QoE尺度を複数個の構成概念(因子)に集約してその間の因果関係を表現できるモデルを完成した。更に、因果方向も考慮して、ネットワークのQoS (Quality of Service: サービス品質)パラメータの構成概念も加えたモデルに拡張した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

因果関係モデルは、全ての学術分野における基盤である。しかしながら、インターネットにおけるマルチメディア通信QoEについては、その基礎的な研究さえもなされていなかった。送信側と受信側とで因果関係が異なることのメカニズムの解明や数理的モデルの構築は、因果推論の学術分野を拡大させる。更には、高度情報ネットワーク社会の安全かつ円滑な発展のために有用である。  
また、力覚・音声・ビデオ通信は有望な次世代通信技術であり、そのQoE数理モデル構築はこの技術の発展に大いに役立つものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：This project aims at establishing a framework of Bayesian methodologies for statistical causal inference of QoE (Quality of Experience) in haptic audiovisual interactive communications.

We first proposed an empirical method for inferring causal directions of constructs in multidimensional QoE by structural equation models (SEMs) each with three constructs. Six SEMs with different directions were compared to show the one from the domain knowledge more plausible. We noticed that QoE can behave like the "impact-perceive-adapt" model reported by the University of Manchester in 2007.

We next studied how QoS (Quality of Service) affects prediction accuracy of multidimensional QoE by taking into consideration the causal direction of QoS to QoE. We proposed SEMs and MIMIC (Multiple Indicator Multiple Cause) models, which were compared with traditional logistic regression models. We found that multiple QoE measures should be utilized jointly rather than resorting to QoS information only.

研究分野：工学

キーワード：マルチメディア通信 QoE 統計的因果推論 ベイズ統計モデル 構造方程式モデル MCMCシミュレーション インターネット高度化

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

インターネット上でのマルチメディア通信における QoE (Quality of Experience: ユーザ体感品質)の因果関係は、情報発生点(送信側)と受信側とで異なってくる可能性がある。これは、パケット通信の動作原理とネットワーク内の遅延・遅延揺らぎに起因する。パケットはネットワーク内のルータで蓄積・中継されて送信側から受信側に到着するので、送信された情報の時間構造は乱される。これが、因果関係の質を劣化させる。

従来の自然科学や社会科学の因果関係モデルは、生起事象の時間構造が乱れることを想定していない。また、因果関係の伝達時間を陽に考慮したモデルは極めて少ない。「因果関係の質と伝達時間」はネットワークを介した活動の特徴であり、このことが、マルチメディア通信 QoE における因果関係モデルを、従来の因果関係モデルとは異なったものにする。新たなモデリング法を探索することが必要となるが、そのような研究は、本研究開始時点では行われていなかった。

研究代表者は、科研費基盤研究(C)(平成 25~27 年度)と同(平成 29~令和元年度)において、ベイズ統計学による QoE 数理モデル構築の研究を行っており、この方法論の有効性を立証している。2015 年 IEEE ICC(International Conference on Communications)で発表した単一尺度 QoE の推定・予測ベイズ階層回帰モデルは、世界初の QoE ベイズ統計モデルである。この研究を発展させて、IEEE Transactions on Multimedia に論文として掲載している。2016 年には、14 個の多次元 QoE 尺度を 3 種類に分類し、各種類を仮想的な構成概念(construct: 因子分析における因子と同じ)の観測変数としたうえで、3 構成概念と 14 観測変数とからなるベイズ構造方程式モデル(Structural Equation Model: SEM)を構築した。3 構成概念間の因果構造を回帰モデルで表現した。これも世界初の多次元 QoE ベイズ統計モデルであった。SEM は、統計学における基本問題「相関は必ずしも因果関係を意味しない」を解決できる。更に、2019 年には、2016 年の SEM を離散データに拡張したモデルを完成した。これにより、音声ビデオ品質構成概念と力覚品質構成概念との両方がユーザ満足度などのユーザエクスペリエンス構成概念に因果効果を持つことを定量的に明らかにした。これが本研究の出発点である。

以上述べたように、本研究開始時点では、QoE の推定・予測と因果関係とを包括的に取り扱う数理モデルは、研究代表者が提案したベイズ統計モデリング法しか存在しなかった。

## 2. 研究の目的

マルチメディア通信 QoE における因果関係が、従来の自然科学や社会科学の因果関係モデルとは異なる特徴を持つことを考慮して、その数学的モデリング法の枠組みを構築することを目的とする。

研究代表者が提案した多次元 QoE 推定・予測のためのベイズ統計モデリング法を因果推論法に拡張し、多次元 QoE 因果構造モデリング法を確立する。更に、各 QoE 尺度間、または QoE 尺度と QoS (Quality of Service: サービス品質)パラメータやユーザ情報・使用環境との因果関係を表現することができるモデルを構築することも目指す。

加えて、QoE モデリングによって明らかにされた因果関係を用いて QoE を向上する方策を探ることも目的の一つである。

## 3. 研究の方法

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

を対象とする。以前に受給した科研費によって構築した力覚・音声・ビデオインタラクティブ通信実験システムを用いて取得した主観評価データ(5段階評点)を利用する。それらのデータにベイズ統計モデリング法を適用し、QoE 数理モデルを構築する。MCMC(Markov chain Monte Carlo)シミュレーションによりベイズモデルの事後確率分布の計算をおこなう。シミュレーションには、フリーソフト OpenBUGS または JAGS を用いる。新たな主観評価実験は行わず、本研究では数理モデルの構築と妥当性検証に専念する。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る。

研究目的を達成するために、以下の課題を 2020 年度から 2022 年度の 3 年間で研究する。

【2020 年度】2020 年 2 月に ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications and Applications に掲載された方法(DOI: 10.1145/3375922) (研究代表者の令和元年度科研費研究成果)を用いて、多次元 QoE 尺度の構成概念(因子)間の因果方向を表現できる SEM を構築することを検討する。特に、SEM モデルで仮定した構成概念間の因果の方向を、観測データから立証することを目指す。また、タスクや受信バッファリング制御方式などの要因が因果構造に及ぼす影響を解明することも試みる。

【2021 年度】SEM モデルにおける構成概念間の因果方向確率を計算する方法を研究する。まずは、異なる因果方向を持つ複数のモデルを構築し、以前の研究で用いたモデル評価尺度である情報量基準 DIC(Deviance Information Criterion)や新しい情報量基準 WAIC(Widely Applicable Information Criterion)で、各モデルの統計的適切度の評価を試みる。この方法によりモデル間の適切度の違いを表現できない場合には、各モデルにおける因果方向確率の計算方法を考案する。

次に、SEM 因果構造モデルに、アプリケーション層以下の QoS パラメータ集合を組み込んだ拡張モデルを構築ことに着手する。これにより、QoE と QoS との因果関係を解明するとともに、SEM 因果構造モデルの精度向上も狙う。

【2022 年度】2021 年度に研究に着手した QoE-QoS 因果関係モデルの完成を目指す。まず、因果方向を考慮して、QoS 情報を力覚・音声・ビデオ三感通信多次元 QoE モデルに組み込むことを考える。特に、QoS 情報が多次元 QoE の予測に寄与するかという課題に取り組む。QoS パラメータを組みこんだ拡張 SEM モデルとともに、従来の QoS ロジステック回帰による 1 次元 QoE モデルとの比較も行う。また必要ならばモデルの更なる拡張も行い、因果関係の質(時間構造劣化)と因果関係伝達時間が QoE に及ぼす影響の解明を行う。

加えて、因果関係の質と伝達時間の観点から、QoE 向上方策としてこれまでヒューリスティックに提案されている方式のいくつかの仕組みを分析するとともに、因果関係を考慮に入れた、新たな QoE 向上方策を探ることも試みる。

#### 4. 研究成果

力覚・音声・ビデオインタラクティブ通信の多次元 QoE について、次の二つの成果が得られた。

##### (1) 構成概念間で異なる因果方向を持つ複数 SEM 間の因果方向確率計算(研究業績[1])

多次元 QoE を、3 個の構成概念(音声ビデオ品質 AVQ, 力覚品質 HQ, ユーザ体感品質 UXQ)で表現するベイズ統計構造方程式モデル(SEM)について、6 種類の因果方向のモデルを構築した。すなわち、(a) AVQ → UXQ → HQ, AVQ ↔ HQ(AVQ と HQ とに相関がある), (b) AVQ → UXQ → HQ, (c) AVQ

UXQ HQ, AVQ HQ, (d) AVQ UXQ HQ, AVQ HQ, (e) AVQ UXQ HQ, AVQ HQ, (f) AVQ UXQ HQ, AVQ HQ の6方向である。各モデルの情報量基準 DIC と WAIC とを計算し比較した。MCMC シミュレーションにはソフトウェア OpenBUGS を利用した。その結果、情報量基準の値は、モデル間でほとんど差がないことが分かった。そのため、因果方向の違いを識別可能とする新たな方法を考案することが必要になった。

そこで、QoE 予測に基づく因果方向識別のための方法を提案した。各モデルにおける外生変数となる構成概念の indicator (QoE 尺度)の観測値を条件として与え、内生変数となる構成概念の QoE 尺度を予測する。予測された QoE 尺度の事後平均値と観測値による平均オピニオン評点 (Mean Opinion Score: MOS)との平均二乗誤差(MSE)とを計算し、全ての QoE 尺度について平均する。そして、二つのモデル M1, M2 を取り上げ、一つのモデル M1 の平均 MSE が他方 M2 のものより小さくなる確率を計算する。その確率をモデル M1 の M2 に対する因果方向確率とするのである。

前述の因果方向(a)を基準として、他の5方向(b)~(f)と比較した。その結果、因果方向確率  $P1=P[AVQ \rightarrow UXQ \rightarrow HQ]$ ,  $P2=P[AVQ \rightarrow UXQ \rightarrow HQ]$ が、音声・ビデオと力覚ストリーム間の遅延差(プレイアウトバッファリング時間差)が零のとき  $P1 > P2$  であるが、遅延差がある値まで増大すると確率の大小関係が逆転し、更に遅延差が大きくなると再び逆転して元に戻るという現象を発見した。

関連研究として、2007年の英国マンチェスター大学による impact-perceive-adapt 現象がある。これは、ビデオと力覚間の遅延差がある程度大きくなると因果方向が消失する(breakdown of the perception of immediate causality)という仮説である。本科研費研究成果は、その数理的証明になるとともに拡張形にもなっている。因果方向のフリップフロップ的動作は、自然科学や社会科学における従来の因果関係には見られない新しい発見である。

この研究成果は、“An Empirical Method for Causal Inference of Constructs for QoE in Haptic-Audiovisual Communications,”と題した論文として、2022年1月に ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications and Applications に掲載されている(研究業績 [1])。

## (2) 因果方向を考慮したQoS情報の利用が多次元QoEの予測に及ぼす影響の評価

QoEとQoSとの関連性の数理モデル化は、これまで多くの研究が行われており、QoE分野における古典的問題である。しかし、従来研究は、通常、単一尺度QoEを、因果方向を考慮せずQoSから予測している。因果方向をモデル化し多次元QoEをQoSから予測する先行研究は全く見られない。

そこで本研究では、因果方向を考慮してQoS情報を多次元QoEモデルに組み込んだベイズモデルを提案し、1次元QoE尺度のQoSパラメータによるロジスティック回帰(従来研究における典型的な手法)と予測精度を比較した。提案したのは、SEMとMIMIC (Multiple Indicator Multiple Cause) の2種類4モデル、3C-SEM, 6C-SEM, 3C-MIMIC, 1C-MIMICである。3C-SEMは、QoSを考慮しない場合と同様に、3個の構成概念(3C: 音声ビデオ品質eAVQ, 力覚品質eHQ, ユーザ体感品質eUXQ)から成るSEMである。ここでの構成概念は、QoSがない場合から拡張された拡張構成概念であり、観測変数(indicator)として、QoE尺度(effect indicator)に加えて、QoSパラメータ(cause indicator)も持っている。そのため、その接頭語として“extended”の“e”が付けられている。6C-SEMは、3C-SEMにおける各構成概念をQoS用とQoE用とに分離している。MIMICは、QoSを原因(Cause)、QoEを結果(Effect)とするものである。3C-MIMICと1C-MIMIC(それぞれ構成概念数 3, 1)とを検討した。予測すべきQoE尺度数を1から13(12個の主観品質変数と1個の客観品質変数

)まで変えて解析した。MCMCシミュレーションによるモデル比較を行い、評価尺度として10分割交差検証平均二乗誤差と情報量基準WAICとを用いた。シミュレーションにはソフトウェアJAGSを利用し、パッケージR2jagsを介してR環境で実行した。

その結果、まず、すべての主観品質変数のQoEについては、3C-SEMや3C-MIMICは、ロジステック回帰モデルより高い精度を実現するが、客観品質変数のQoEについてはほとんど同じであることが明らかになった。6C-SEMは、3C-SEMと同程度であった。また、QoE尺度数が構成概念数の2倍以上の場合には3Cが優れていて(6Cは同程度)QoSの影響は低いが、それ以外では1C-MIMICが高精度であることも判明した。この成果は、論文 Shuji Tasaka, “Usefulness of QoS in Multidimensional QoE Prediction for Haptic-Audiovisual Communications” として、ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications and Applications に投稿済である

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 18
2. 論文標題 An Empirical Method for Causal Inference of Constructs for QoE in Haptic-Audiovisual Communications	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications and Applications	6. 最初と最後の頁 1,24
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1145/3473986	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 -

〔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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------