

量子意思決定によるユーザーの動画ストリーミング視聴時の 画質選択のモデル化

大歳 達也[†] 村田 正幸[†]

[†] 大阪大学 大学院情報科学研究科

〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5

E-mail: †{t-otoshi,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし 動画ストリーミング配信を始め、様々なサービスがインターネットを介して提供されている。今後、ネットワークの仮想化技術が進み、サービス毎にネットワークを構築し、制御することで、サービスに適したネットワークの運用が可能になると期待される。この際には、ユーザーが実際に体感するサービス品質 (QoE) の観点からネットワークの構築、運用を設計する必要がある。このようなユーザーの QoE をモデル化する研究は、従来より進められてきているものの、ユーザーの心理的な効果によって QoE が変化するため、従来のモデルでは表現が困難な状況が生じうる。一方で、人の認知状態及び意思決定を表現するモデルとして、近年、量子意思決定が注目され始めている。量子意思決定では、従来の認知モデルでは表現が困難な、人の振る舞いをも表現可能であり、より表現力の高いモデルとして有望視されている。本稿では、この量子意思決定を用いて、動画ストリーミング視聴時のユーザーの振る舞いをモデル化することを試みる。そして、シミュレーションにより、ユーザーの心理的な効果も含めた画質選択の傾向をモデル化可能であることを示す。

キーワード 量子意思決定, QoE, 動画ストリーミング, MPEG-DASH

Modeling User's Resolution Selection in Video Streaming by Quantum Decision Making

Tatsuya OTOSHI[†] and Masayuki MURATA[†]

[†] Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

1-5 Yamadaoka, Suita, Osaka, 565-0871, Japan

E-mail: †{t-otoshi,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

Abstract Various services including video streaming are provided via the Internet. In the future, as network virtualization technology advances, building and controlling a network for each service is expected to make the network suitable for the service. In this case, it is necessary to design the network construction and operation from the viewpoint of the quality of experience (QoE) of users. Although research on modeling QoE of users has been advanced, the QoE changes according to the user's psychological effect, so it can be difficult to model the complete QoE in the conventional model. On the other hand, quantum decision making has begun to be drawing attention in recent years as a model expressing human cognitive state and decision making. In quantum decision making, it is possible to represent human behavior, which is hard to express in the conventional cognitive model, and it is regarded as promising as a more general model. In this paper, we attempt to model user's behavior when viewing video streaming by the quantum decision making. Through simulation, we show that the tendency of video resolution selection caused by psychological effects of users can be modeled.

Key words Quantum Decision Making, QoE, Video Streaming, MPEG-DASH

1. はじめに

動画ストリーミング配信を始め、今日では、様々なサービスがインターネットを介して提供されている。ユーザーがこのようなサービスを楽しむ際には、スループットなどのネットワークの通信品質によって、サービスに対するユーザーの満足度は影響を受ける [1]。そのため、ユーザーが楽しむサービス品質を評価、予測することは、サービスの設計及び、ネットワークの設計を含めたトータルの設計において必要となる。

一方で、近年は、ネットワーク仮想化の技術が進展しており、サービス毎に個別の仮想ネットワークを構成するなど、サービスとネットワークの同時設計が現実味を帯びてきている。従って、ネットワークの通信品質だけではなく、通信品質のもとでユーザーがどのような体感品質を楽しむかを知ることの重要性が増してきている。

このような要請もあり、ユーザーのサービス体感品質 (QoE:Quality of Experience) に関する研究が進められている [1-3]。文献 [2] では、ネットワーク品質のみでは、ユーザーの不満を見落とすことがあり、ネットワーク品質とユーザーの行動を両方もちいることで、QoE の推定精度を向上できることが示されている。また、文献 [3] では、ネットワーク品質自体ではなく、ストリーミング視聴中に解像度の変更頻度によって、ユーザーの QoE に影響を受けることを説明するモデルを提案している。

ところが、ユーザーの QoE は、ユーザーが視聴する動画自体に加えて、認知の過程上で生じる様々な効果の影響を受ける。例えば、文献 [4] では、ユーザーがストリーミング配信を視聴する際に、同じ画質の動画であっても、画質の選択をユーザー自身が選択したか否かによって、サービスに対する満足度が異なることが実験的に示されている。これは、ユーザーが自分の決定を否定するような認知不協和の心理状態を回避したものと説明される。従って、このような心理的な効果も含めたモデル化を行うことが、真のユーザーの QoE のモデルとして必要になる。

近年、人間の心理的な効果も含めた認知、意思決定のモデルとして、量子意思決定が注目され始めている [5-9]。量子意思決定では、人間の認知状態を量子状態と対応させ、確率的な意思決定を、量子状態の観測と対応させることで、人間の認知、意思決定をモデル化している。これによって、人間の心理的な効果が、対応する量子効果によって説明される。例えば、認知不協和は、直前の選択によって、認知状態が特定の選択を行う状態に波動関数が収束したものとして説明される [9]。また、特定の二つの意思決定を行う場合に、その決定の順序によって結果が異なる順序効果については、観測演算子の非可換性によって説明される [5]。

認知不況和や順序効果などの心理効果は、インターネット上のユーザーにも見られる効果であり、文献 [4,10] などで報告されている。従って、量子意思決定を用いてユーザーの意思決定をモデル化することで、これらの心理的な効果も含めたより適用領域の広いモデルを構築可能であると考えられる。

本稿では、動画ストリーミング配信サービスを題材として、そのユーザーが画質選択を行う際の意思決定を量子意思決定に

よってモデル化する。ユーザーは部分的に合理的な選択が可能であると仮定し、ネットワークの状態に応じて、適切に画質を選択するモデルを提案する。提案したモデルを用いて、シミュレーションを行い、モデルの振る舞いを調べ、量子パラメータによってユーザーの画質選好が表現可能であることを示す。

以降の本稿の構成は次の通りである。2. 章では、QoE 及び認知モデルに関する関連研究をまとめる。3. 章では、量子意思決定の概要及び、モデルの詳細について述べる。4. 章では、本稿で提案するストリーミング視聴時のユーザーの画質選択モデルについて述べる。5. 章では、4. 章で提案したモデルの振る舞いをシミュレーションにより調べ、モデルがネットワークの状況に応じた画質選択を表現していること及び、量子パラメータによってユーザーの画質選好が表現可能であることを示す。6. 章では、本稿のまとめと今後の課題について述べる。

2. 関連研究

インターネットでは、様々なサービスが通信を行っており、サービス毎に異なった通信品質 (QoS:Quality of Service) が要求される。このため、要求される通信品質を提供するようにネットワークを制御する手法が検討されてきた [11]。

しかし、実際にサービスを楽しむのはユーザー自身であり、本来は、ユーザーの満足度 (QoE) に基づいて制御することが望ましいと考えられる。文献 [12] では、ユーザーのリスク嗜好性に基づいて、適切な QoE となるように通信のレートを制御する手法が提案されている。

このような QoE ベースの制御を行う上で、QoE を定量化するモデルが重要となる。QoE を数値として測定する方法には、例えば、ITU-T によって定められた MOS (Mean Opinion Score) を用いる方法がある。これは、サービスに対する満足度をユーザー自身が 1~5 の評点で主観的に評価し、その平均的な値を評価スコアとして用いるものである。

QoE のモデルでは、このような数値化されたユーザーの満足度を、その背景にある要因によって定量的に表現する。文献 [1] では、遅延などの QoS 指標と、提供されたコンテンツに対する好みなどのユーザーの主観的な要因から、ユーザーのサービスに対する満足度を表現するモデルを提案している。また、文献 [13] では、画質、画質の変化、再生停止時間、再生開始までの時間を用いた QoE のモデルを提案している。

しかし、QoE は、ユーザーの心理的な要因にも左右されるため、様々な心理効果の影響を受ける。文献 [4] では、認知不協和と呼ばれる心理効果によって、ストリーミング視聴中に特定の画質を選択したユーザーは、その画質の満足度が向上することが確認されている。また、文献 [10] では、Web ページを閲覧するユーザーが、直前に見たページの表示時間によって、次のページの満足度が影響を受けることが確認されている。

このような、心理的な効果も含めた認知、意思決定のモデルの研究は、心理学、行動経済学を含めた幅広い分野で進められている。中でも、確率的な要素を伴う意思決定の中で人間のリスク嗜好性を含めた意思決定のモデルとして、プロスペクト理論が有名である [14]。プロスペクト理論では、従来の期待効用理論における効用関数の代わりに価値関数を、客観的な確率の

代わりに主観的な確率を導入することで意思決定をモデル化する。このモデルによって、人間の損失回避の傾向や低確率の過大評価などを表現することができる。一方で、プロスペクト理論の限界も指摘されており、順序効果を初めとしたいくつかの心理効果はプロスペクト理論でモデル化できないことが知られている [15]。

近年、このような従来のモデルで説明できなかった心理効果も含まれた意思決定のモデルとして、量子意思決定が注目され研究が進められている [5–9]。量子意思決定の詳細については 3. 章に記載するが、このモデルでは、人間の認知状態を量子状態としてモデル化し、意思決定は、量子の観測と対応付けて説明される。量子論において、量子は観測によってその状態が変化するため、量子意思決定では、意思決定によって認知状態の変化が生じることを自然に記述することができ、順序効果を初めとした様々な心理効果をモデル化することができる。

本稿では、動画ストーリーミング視聴中のユーザーに生じる心理的な効果の量子意思決定によるモデル化を提案する。そして、シミュレーションによりモデルの振る舞いを検証し、量子パラメーターによってユーザーの画質選好を表現可能であることを示す。

3. 量子意思決定

量子意思決定は人間の認知、意思決定をモデル化する理論の一つであり、従来の意思決定理論では説明できなかった心理効果を説明できるモデルとして、近年、注目されている。

量子意思決定では、人間の認知状態は量子状態として記述される。この認知状態は、意思決定を行う際にどの程度の確率で各選択肢を採るかを記述した状態を表す。そして、意思決定自体は量子の観測と対応付けて記述される。量子論において、量子の観測は、ある量子状態を特定の物理量が確定した状態へと遷移させる写像として定義される。これに基づいて、量子意思決定は、複数の選択肢の間で確定していない量子的な認知状態から、特定の選択肢を選択する状態への写像として意思決定が定義される。図 1 に従来の意思決定と量子意思決定を対比した概要図を示す。

以降の本章では、量子意思決定における認知状態及び意思決定の数理的なモデルについて説明する。

3.1 認知状態

量子意思決定において、認知状態は、量子状態を表すヒルベルト空間 \mathcal{H} 上の元

$$|\psi\rangle \in \mathcal{H} \quad (1)$$

で表される。

この量子状態 $|\psi\rangle$ は、対応する基底を用いて表現することで、特定の意思決定における確率的な選択を表す。

例えば、2つの異なる選択肢 $\pi_i (i = 1, 2)$ が存在して、それぞれの選択肢を確率 1 で選択する認知状態を $|\pi_i\rangle$ を基底として、

$$|\psi\rangle = p_1 |\pi_1\rangle + p_2 |\pi_2\rangle \quad (2)$$

と表せるとする。ここで、 p_1, p_2 は確率振幅と呼ばれるスカラーである。

この時、量子状態 $|\psi\rangle$ は、 $|\pi_1\rangle$ と $|\pi_2\rangle$ の重ね合わせ状態にあると言い、選択肢 π_1 を $|p_1|^2$ の確率で選択し、選択肢 π_2 を $|p_2|^2$ の確率で選択するような認知状態を表す。

3.2 意思決定

量子論では、重ね合わせ状態にある量子状態には物理量は定まっておらず、特定の物理量についての測定を行うことによって、初めてその物理量が定まる。これと同様に、量子意思決定は、量子状態として表現された認知状態に”観測”の操作を加えることで、重ね合わせ状態にあった選択が特定の選択へと移る。ここでの観測は意思決定のトリガーとなる現象を意味しており、選択を問うような質問を行う、あるいは、自問するなどの行為を表す。

意思決定はヒルベルト空間 \mathcal{H} 上のエルミート演算子 \hat{A} によって定義される。 \hat{A} の固有ベクトル $|a_1\rangle, \dots, |a_n\rangle$ は、それぞれ選択肢 a_1, \dots, a_n を確率 1 で選択する認知状態を表す。

ある認知状態 $|\psi\rangle \in \mathcal{H}$ において、 \hat{A} で表される意思決定を行った場合、選択肢 a_i を選ぶ確率 $P(a_i)$ は、

$$P(a_i) = \||a_i\rangle \langle a_i | \psi\rangle\|^2 \quad (3)$$

で表される。ここで、 $\langle x |$ は $|x\rangle$ の転置複素共役であり、 $\||x\rangle\| = \sqrt{\langle x | x\rangle}$ はヒルベルト空間上のノルムを表す。

そして、一旦意思決定が行われ、選択肢 a_i が選択されると、認知状態 $|\psi\rangle$ は、 $|a_i\rangle$ に不連続に変化する。従って、意思決定の前後で、認知状態は次のように確率的に推移する。

$$|\psi\rangle \rightarrow |a_i\rangle \text{ with probability } P(a_i) \quad (4)$$

このように、自身の行った意思決定に依存して、認知状態が変化することが、量子意思決定の大きな特徴の一つである。これによって、どの意思決定を先に行うかによって、連続した意思決定の結果が異なり、順序効果や認知不協和をモデル化することができる [6, 9]。

3.3 干渉項

重ね合わせ状態において、選択肢間で干渉が生じ、確率の和の法則が破られることがある。

例えば、式 (2) の重ね合わせ状態に対して、エルミート演算子 \hat{A} による意思決定を行った場合に、 a_i を選択する確率は、

$$P(a_i|\psi) = \|\sqrt{p_1}P(a_i|\pi_1) + \sqrt{p_2}P(a_i|\pi_2)\|^2 \quad (5)$$

である。ただし、

$$P(a_i|\pi_i) = \||a_i\rangle \langle a_i | \pi_i\rangle\|^2, \quad i = 1, 2 \quad (6)$$

であり、これは、認知状態 π_i にある場合に a_i を選択する確率を表す。

$\psi \rightarrow a_i$ の確率は $|p_i|^2$ であるから、 ψ の状態から初めて a_i を選択するか確率は、古典的には確率の和の法則から

$$P_c(a_i|\psi) = p_1 P(a_i|\pi_1) + p_2 P(a_i|\pi_2) \quad (7)$$

となる。

しかし、この確率は式 (5) と一致しない。この確率のずれ

$$f(a_i|\psi) = P(a_i|\psi) - P_c(a_i|\psi) \quad (8)$$

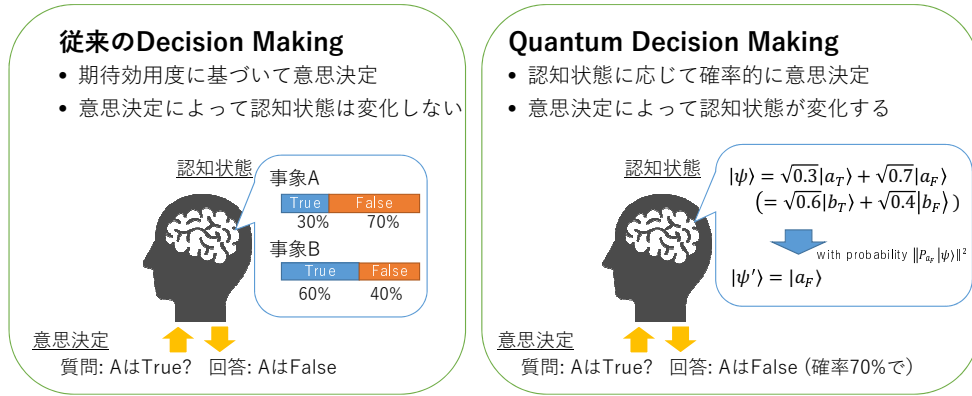


図 1 従来の意思決定と量子意思決定

を干渉項と呼ぶ。量子意思決定では、この干渉項が存在することで、古典的な確率論で説明ができない人間の心理効果 Conjunction fallacy 等が説明できる [6]。

3.4 量子強化学習

人間の認知状態は、受け取る情報に応じて変化する。量子意思決定では、このような外界の情報に応じて認知状態を更新するモデルについては、研究の途上であるが、その候補の一つとして量子強化学習がある [6, 16]。

量子強化学習では、複数の基底の重ね合わせ状態にある認知状態から、新しい情報を反映して、特定の基底の確率を増加させるように状態の更新を行う。

時刻 t の認知状態を $|\psi(t)\rangle$ として、新しい情報 x を得た場合に、認知状態の更新は

$$|\psi(t+1)\rangle = Q(x)|\psi(t)\rangle \quad (9)$$

で表される。ここで、 $Q(x)$ は状態の更新を表す演算子である。

$Q(x)$ としては、次式で表される確率振幅増幅が用いられる [6]。

$$Q(x) = (Q_2 Q_1(x))^L \quad (10)$$

$$Q_1(x) = I - (1 - e^{i\phi_1}) |\pi_x\rangle \langle \pi_x| \quad (11)$$

$$Q_2 = (1 - e^{i\phi_2}) |\psi(t)\rangle \langle \psi(t)| \quad (12)$$

ここで、 ψ_x は情報 x を受け取った時に確率が増加する選択肢を表し、 L, ϕ_1, ϕ_2 はパラメーターである。

4. ストリーミング視聴時の画質選択のモデル化

前節で述べたように、量子意思決定では、従来の認知モデルでは説明できない心理的な効果が、観測による不連続な状態の推移や、干渉と言った量子論独特の性質と対応づけて説明することができる。

インターネット上ユーザーにおいても、順序効果や認知不協和などの心理的な効果が現れることが確認されており [4, 10]、これらの効果を包含する量子意思決定によってユーザーの振る舞いをモデル化することで、心理的な効果も含めたより適切なモデルが構築可能であると考えられる。

本稿では、MPEG-DASH によるストリーミング視聴時のユーザーの画質選択という意思決定に焦点を当てて、量子意思決定によるモデル化を試みる。

以降の本節では、認知状態、意思決定、状態更新のそれぞれについて、ユーザーの画質選択の量子意思決定によるモデル化の詳細について述べる。

4.1 認知状態のモデル化

MPEG-DASH によるストリーミングを視聴する際、ユーザーはサーバー側に用意された画質プロファイルの中から、その時の状況に合わせて画質を選択する。

従って、予め用意された画質プロファイル q_i が画質選択における選択肢となる。各画質プロファイル q_i を決定的に選択する認知状態を $|q_i\rangle$ とすると、認知状態はそれらの重ね合わせとして、

$$|\psi\rangle = \sum_i \psi_i |q_i\rangle \quad (13)$$

で表される。ここで、係数 ψ_i は確率振幅を表す。

4.2 意思決定のモデル化

意思決定では、複数の画質プロファイルの中で迷っている重ね合わせの認知状態から、特定の画質プロファイルを選択する。

意思決定を定めるエルミート演算子 \hat{A} の固有ベクトル $|a_i\rangle$ は、認知状態の基底と対応していることが望ましく、

$$|a_i\rangle \approx |q_i\rangle \quad (14)$$

がユーザーの部分的な合理性から要請される。

すなわち、 i 番目の画質プロファイルが適切だと認知される状況であれば、ほぼ確実に、ユーザーは i 番目の画質プロファイルを実際に選択すると仮定する。

4.3 状態更新のモデル化

ユーザーが合理的であればストリーミングの視聴を通して、通信状況を把握し、回線速度が遅いと感じた場合は、低画質を選択し、回線速度に余裕があると感じた場合には、高画質を選択することで、自身の体感品質を高めるように画質の選択を行う。

文献 [13] では、ストリーミング視聴時の体感品質を、(1) 画質、(2) 画質の変化、(3) 再生停止時間、(4) 再生開始までの時間の 4 つの重み付け和として、次式のようにモデル化している。

$$F^k = \sum_{t=1}^k \{r(t) - \lambda|r(t+1) - r(t)| - \lambda_d d(t)\} - \lambda_s s \quad (15)$$

$r(t)$ は時刻 t における画質であり、 $d(t)$ は途中で再生が停止さ

れた期間の長さ、 s は再生開始までの時間を表す。

上の体感品質は、スループット及びバッファリングされている動画の長さを用いて計算することができ、最大の体感品質を与えるような画質プロファイル

$$r^{\text{rat}} = \arg \min_r F^k \quad (16)$$

がその時の情報を元に選ぶべき合理的な画質選択となる。

従って、式 (9) において、 $\psi_x = r^{\text{rat}}$ として、 r^{rat} を選択する確率を増加するように状態更新を行うことで、ユーザーの認知状態の更新をモデル化する。

5. シミュレーション

前章で提案した量子意思決定による画質選択のモデルの振る舞いを調べるため、シミュレーションを行った。

シミュレーションでは、MPEG-DASH [13] の振る舞いを模した動画プレイヤーによって、ストリーミング視聴中にスループットの変化に伴う動画バッファの増減及び動画の中断を擬似的に再現する。そして、スループット及び残りバッファの情報をユーザーのモデルに与えることで、量子意思決定に基づいて、認知状態を更新し、各時刻における画質の選択確率を計算する。

本稿では、シミュレーションの下で、ユーザーのモデルに与える情報を変えながら、画質の選択確率を計算することで、モデルの振る舞いを検証する。

5.1 シミュレーション環境

シミュレーションでは、MPEG-DASH によって動画ストリーミングを視聴する際のユーザーの振る舞いを調べる。

MPEG-DASH では、サーバーに動画コンテンツが配置され、動画プレイヤーがネットワークを介して動画を逐次ダウンロード、再生を行う。サーバーに格納された動画コンテンツは、一定時間毎のセグメントに分割されており、動画プレイヤーはこのセグメントを順にダウンロードする。また、動画プレイヤーはバッファを保持しており、ネットワークのスループットに余裕がある場合には先のセグメントを読み込んでいる。そして、バッファからセグメントを順次読み出して、動画を再生する。本シミュレーションでは、セグメント長は 4 秒、バッファに読み込む動画の最大長は 30 秒とした。

動画プレイヤーでは、受け取るセグメントからネットワークのスループットの計測を行っており、ユーザーは、動画プレイヤーを介してスループット及びバッファ内の動画長の情報を受け取れる。それらの動画プレイヤーから受けた情報を用いて、モデルに沿って選択できる画質に関する認知状態を更新する。この際には、ユーザーには High, Middle, Low の 3 種類の画質の選択肢が与えられるものとして、それぞれのレートは 300, 200, 100 単位レートであるとした。

また、量子強化学習のパラメータは $L = F^k, \phi_1 = \phi_2 = 0.15\pi$ に設定した [6]。

5.2 選択確率の推移

はじめに、モデルの基本的な振る舞いを確認するため、途中でネットワークのスループットに変化が生じた場合の画質の選択確率の推移をシミュレーションによって確かめた。

図 2 では、時刻 50 においてスループットが 300 から 100 単位レートとなるように変化を与えた場合の各画質の選択確率の

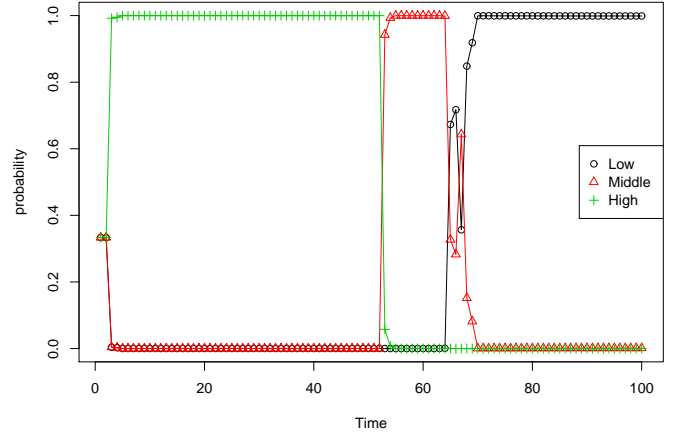


図 2 各画質の選択確率の推移を示している。図の横軸は時間であり、縦軸は画質の選択確率である。図中の凡例 High, Middle, Low はそれぞれの画質の選択確率を表している。

図より、スループットが下がった時刻 50 以降で、画質 High を選択する確率が高い状態から、Middle の確率が高い状態を経て、Low の確率が高い状態へと推移していることが分かる。ネットワークのスループットが 300 から 100 に変化しているにも関わらず、200 単位レートの画質 Middle が選択される確率が高い期間が生じるのはバッファが存在するためである。すなわち、スループットが急激に減少したとしても、既にバッファ内に読み込まれた動画を再生することができるため、すぐに低画質に変更するよりも中程度の画質を選択した方が、ユーザーの体感品質 F^k が高くなるためである。その後、スループットが低い状態が続くことでバッファ内の動画を消費していくため、最終的には画質 Low が選択される状態へと推移する。

このように、基本的なモデルの振る舞いは直観的な振る舞いと大きく異なるものではない。これは、式 (8) から示唆されるように、途中で意思決定が割り込まない場合は、量子意思決定の振る舞いは古典的な意思決定の振る舞いをベースとした振る舞いをするためである。次節では、量子状態におけるパラメータによって生じる振る舞いの違いを調べる。

5.3 量子パラメータによる画質嗜好傾向

式 (5) より、認知状態の基底 $|\pi_i\rangle$ と意思決定の固有ベクトル $|a_i\rangle$ にずれが生じる場合に、量子干渉が生じることが分かる。そこで、 $|\pi_i\rangle$ と $|a_i\rangle$ をわずかにずらした際に、モデルの振る舞いがどのように変化するかを調べる。

そこで、 $|a_i\rangle$ を、次のような微小なパラメータ $\delta\theta$ を持ったユニタリ行列による $|\pi_i\rangle$ の写像とする。

$$|a_i\rangle = U(\delta\theta) |\pi_i\rangle \quad (17)$$

$$U(\delta\theta) = \begin{pmatrix} \cos(\delta\theta) & \sin(\delta\theta) & 0 \\ -\sin(\delta\theta) & \cos(\delta\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (18)$$

$$(19)$$

図 3 では、時刻 50 において、スループットを 200 から 100 単位に変化させた場合について、上記の $|a_i\rangle$ の下でのシミュ

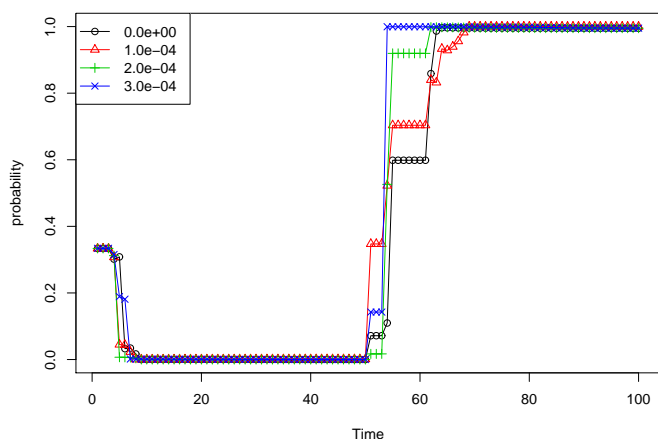


図3 量子パラメーターによるLowの選択確率への影響レーション結果を示している。図では、画質Lowを選択する確率のみを表示しており、図中の凡例は、 $\frac{1}{\pi}\delta\theta$ の値を表している。

図より、パラメーターの値が変わることで、Lowの選択確率が変化していることが分かる。これは、単にユニタリ変換によって π_i と a_i の対応がずれて $P(a_i|\pi_j)$ が変化しただけではない。この $P(a_i|\pi_j)$ の変化は $\delta\theta$ が微小であることからわずかである。すなわち、選択確率の変化は主に干渉項によって生じているものである。

そのため、特に、干渉がない $\delta\theta = 0$ の時の選択確率が0.5付近にある時、すなわち、量子の重ね合わせの性質が強い時に、パラメーターの影響が大きく見られている。このように、量子干渉は、選択肢間で迷っている際に、特定の選択肢をより優先的に選択されるような働きがあることが分かる。したがって、量子パラメーターはユーザーの選択の嗜好を表すものとして解釈可能であると考えられる。

6. まとめ

本稿では、ユーザーの体感品質を考慮した制御に向けて、ユーザーの動画ストリーミングにおける画質選択量子意思決定を用いてモデル化した。そして、シミュレーションを用いて、提案モデルの振る舞いを検証し、量子意思決定における量子パラメーターによって、ユーザーの画質嗜好が表現可能であることを示した。

今後の課題としては、モデル化されたユーザーの振る舞いを用いて、QoEを向上させるようにユーザーにフィードバックを与えるような制御方式の検討と、実際のユーザーデータにモデルをチューニングする方法の検討が挙げられる。

文 献

[1] T. Yamazaki, T. Miyoshi, M. Eguchi, and K. Yamori, "A service quality coordination model bridging QoS and QoE," in *IEEE 20th International Workshop on Quality of Service (IWQoS)*. IEEE, 2012, pp. 1–4.

[2] R. K. Mok, E. W. Chan, X. Luo, and R. K. Chang, "Inferring the QoE of HTTP video streaming from user-viewing activities," in *Proceedings of the First ACM SIGCOMM Workshop on Measurements Up the Stack*, 2011, pp. 31–36.

[3] D. Z. Rodríguez, Z. Wang, R. L. Rosa, and G. Bressan, "The impact of video-quality-level switching on user quality of experience in dynamic adaptive streaming over HTTP,"

EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, vol. 2014, no. 1, p. 216, Dec 2014.

[4] A. Sackl, P. Zwickl, S. Egger, and P. Reichl, "The role of cognitive dissonance for QoE evaluation of multimedia services," in *GLOBECOM Workshops*. IEEE, 2012, pp. 1352–1356.

[5] J. M. Yearsley and J. R. Busemeyer, "Quantum cognition and decision theories: A tutorial," *Journal of Mathematical Psychology*, vol. 74, pp. 99 – 116, 2016, foundations of Probability Theory in Psychology and Beyond.

[6] J. R. Busemeyer and P. D. Bruza, *Quantum models of cognition and decision*. Cambridge University Press, 2012.

[7] V. I. Yukalov and D. Sornette, "Quantum probability and quantum decision-making," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 374, no. 2058, 2015.

[8] J. M. Yearsley and E. M. Pothos, "Zeno's paradox in decision-making," *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, vol. 283, no. 1828, 2016.

[9] R. Franco, "Towards a new quantum cognition model," *arXiv preprint arXiv:1611.09212*, 2016.

[10] T. Hofffeld, S. Biedermann, R. Schatz, A. Platzer, S. Egger, and M. Fiedler, "The memory effect and its implications on web QoE modeling," in *Teletraffic Congress (ITC), 2011 23rd International*. IEEE, 2011, pp. 103–110.

[11] B.-J. Chang and R.-H. Hwang, "Distributed cost-based update policies for QoS routing on hierarchical networks," *Information Sciences*, vol. 159, no. 1–2, pp. 87–108, Jan. 2004.

[12] A. Molnar and C. H. Muntean, "Cost-oriented adaptive multimedia delivery," *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 59, no. 3, pp. 484–499, 2013.

[13] X. Yin, A. Jindal, V. Sekar, and B. Sinopoli, "A control-theoretic approach for dynamic adaptive video streaming over http," in *Proceedings of SIGCOMM*, 2015, pp. 325–338.

[14] A. Tversky and D. Kahneman, "Advances in prospect theory: Cumulative representation of uncertainty," *Journal of Risk and uncertainty*, vol. 5, no. 4, pp. 297–323, 1992.

[15] R. Blutner and P. beim Graben, "Quantum cognition and bounded rationality," *Synthese*, vol. 193, no. 10, pp. 3239–3291, 2016. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1007/s11229-015-0928-5>

[16] D. Dong, C. Chen, H. Li, and T.-J. Tarn, "Quantum reinforcement learning," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, vol. 38, no. 5, pp. 1207–1220, 2008.