

ネットワーク品質とアプリケーションモデルをマッピングするクロスレイヤー型品質評価技術

上吉川直輝* Naoki Kamiyoshikawa
長谷川仁彦† Masahiko Hasegawa
片山育星* Ikutoshi Katayama

Cross-Layer Quality Evaluation Technique Mapping Network Quality and Application Models

*情報技術総合研究所
†通信システムエンジニアリングセンター

要 旨

近年の無線通信技術の発展とIoT(Internet of Things)の普及に伴って、多種多様な情報の伝送ニーズが拡大する一方で、時間帯や場所によって変化する通信環境で、ネットワークの設計から構築、運用までのライフサイクルを通じて、アプリケーションごとに要求されるサービス品質を安定的に提供することが求められる。そこで、無線リンクからアプリケーションレイヤーまでの品質を横断的に評価するクロスレイヤー型品質評価技術と、評価結果に基づくアプリケーション・通信制御技術を開発し、ネットワークライフサイクルを通じた安定的なサービス品質の実現に向けた検証を行った。

1. ま え が き

無線通信技術の発展とIoTの普及によって、多様なサービスが無線通信を介して享受できるようになっている。さらに、少子高齢化に伴う省人化・省力化に対するニーズの高まりから、モビリティ向けの自動運転や無人機による遠隔監視、工場等での様々な機器やセンサーのネットワーク接続による機器の状態監視の実現等、モバイル通信だけでなく、産業分野でも、無線通信が果たす役割の重要性が高まっている。一方、無線通信では時間帯や場所、他ユーザーとの周波数・帯域の共有状況に応じて、通信環境が常に変化することから、ユーザーが求めるサービス品質を維持できない可能性がある。そのため、通信環境の変化に応じて、アプリケーションごとに最適なサービス品質を維持することが求められる。

そこで、アプリケーションごとに最適な通信環境の提供を実現するための要素技術として、無線リンク・物理レイヤーからアプリケーションレイヤーまで横断的にサービス品質を評価するクロスレイヤー型品質評価技術に関する開発に取り組んできた。

本稿では、クロスレイヤー型品質評価技術を活用したネットワークライフサイクルシステムの概要と、クロスレイヤー型品質評価技術について実環境や模擬環境で取得したデータによる具体例を用いて評価した結果を述べる。また、評価結果に基づくアプリケーション・通信制御技術を適用した際のサービス品質改善指針について述べる。

2. ネットワークライフサイクルシステム

異なるサービス品質要件を持つ複数のアプリケーションが同一の無線回線を共用することが想定されるため、ユーザーが求めるサービス品質を維持するためには、従来の回線(セッション)単位の品質である無線品質(RSSI(Received Signal Strength Indicator), SINR(Signal to Interference plus Noise Ratio))やネットワーク品質(遅延・ジッター、パケットロス等)での評価では不十分である。そこで、アプリケーション単位でのサービス品質(Quality of Experience: QoE)や、ユーザーが実際にサービスを通じて得る感情、使いやすさ及び満足度等を含む包括的なユーザー体験(User eXperience: UX)を評価する必要がある。本稿では、サービスの提供者がユーザーに約束するサービス品質の指標をQoEとし、実際にユーザーが体感する品質をUXと定義する。サービス品質はアプリケーションパラメーター(例:映像の場合、解像度やフレームレート等)の設定値だけでなく、無線品質やネットワーク品質によっても変化するため、無線リンクからアプリケーションレイヤーまでの各レイヤーの品質について、レイヤー横断的に関係性を明らかにして定量的に評価するクロスレイヤー型の品質評価技術が必要になる。また、接続される無線通信システムに関する設計情報やサービス運用が想定される事業ドメイン情報についても考慮して評価する必要がある。そこで、クロスレイヤー型品質評価技術を活用し、運用の中で各レイヤーの品質を横断的に評価したデータを、継続的にフィードバックして、ネットワークを設計、構築することで、変動する通信特性によらず、アプリケーションごとに最適なサービス品質でのサービス提供を実現する。

図1にクロスレイヤー型品質評価技術を活用したネットワークライフサイクルシステムの構成を示す。このシステムは、無線品質及びネットワーク品質からサービス品質を推論する機械学習モデルで構成され、クロスレイヤー型品質評価技術によって、アプリケーションごとに最適なサービス品質でのサービス提供を実現する。実際の運用環境に適用後、このシステムはまず学習フェーズとして、通信やアプリケーション、サービス品質の情報をレイヤー横断的に対応付けたマッピング情報に加えて、設計情報や事業ドメイン情報を学習し、モデル構築を行う。学習後は運用フェーズに入って、学習フェーズで構築したモデルに基づいて、実際の環境で取得した無線品質及びネットワーク品質から、アプリケーションのサービス品質を推定・評価する。そして、評価結果に応じてアプリケーションのパラメーターや伝送方法(回線選択, 冗長・連送, 優先制御等)を適切に制御することで、アプリケーションごとに最適なサービス品質でのサービス提供を実現する。また、運用フェーズで得られたデータは、学習フェーズにフィードバックして、モデルを更新し、実際の運用環境に適応する。この際、サービス品質の適切な推定・評価のために重要な技術がクロスレイヤー型品質評価技術である。

3章にクロスレイヤー型品質評価技術について示す。

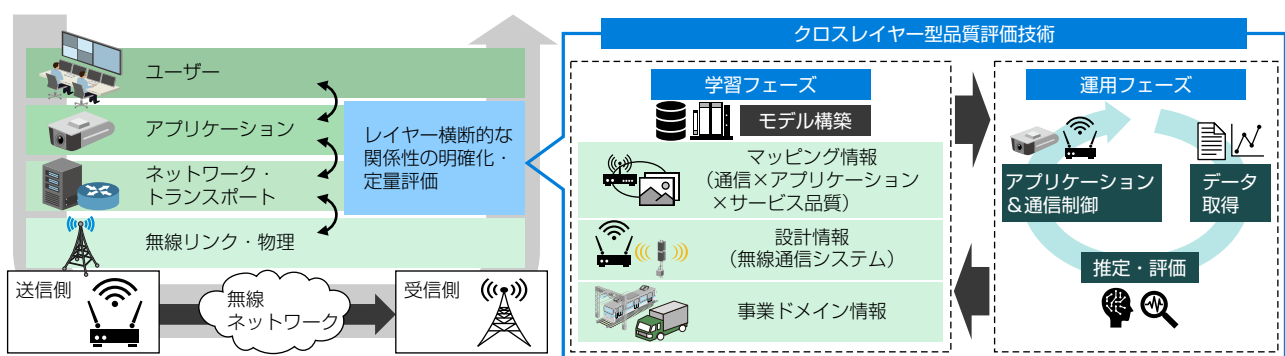


図1-クロスレイヤー型品質評価技術を活用したネットワークライフサイクルシステムの構成

3. クロスレイヤー型品質評価技術

この章では、クロスレイヤー型品質評価技術について述べる。

3.1 概要

この技術では、無線品質やネットワーク品質に係る通信品質とアプリケーションのパラメーター、サービス品質をマッピングし、その関係性を明らかにすることで、通信特性の変化からアプリケーションのサービス品質を推定する。マッピングに当たって、まず、サービス品質の定量評価のため、定量的な評価値を導出する品質評価手法が必要になる。そこで、実環境や模擬、シミュレーション環境から取得したデータや蓄積されたノウハウを基に、この技術を各レイヤーの品質パラメーターの制御装置等に導入するエンジニアが、サービス品質に影響のある各レイヤーの品質パラメーターを抽出する。次に、パラメーター間の関係性、及びシステムの状態遷移等を分析することで、各レイヤーのデータ間での品質情報のマッピング、すなわち、レイヤー間のデータマッピングを行う。その際、パラメーター間の関係性や状態遷移は、接続される無線ネットワークシステムの設計条件やアプリケーションのサービス運用が想定される事業ドメインによっても異なるため、前提になる無線通信システムの設計情報やサービス運用が想定される事業ドメイン情報も考慮する必要がある。これらの情報をクロスレイヤー型品質評価モデルとしてモデル化し、アプリケーションごとに各レイヤーの品質パラメーターの制御装置等に事前に構築することで推定・評価を行う。

3.2 QoE・サービス品質評価手法

アプリケーションのサービス品質の定量化に向けた、映像及び音声サービスでのQoE・サービス品質評価手法の一例を表1に示す。

表1-QoE・サービス品質評価手法の一例

手法分類		評価手法(映像)	評価手法(音声)
主観評価手法		・ITU-R BT.500 ・ITU-T P.910	・ITU-T P.800 ・ITU-T P.835
客観評価手法	Full Reference (FR)	・PSNR(Peak Signal-to-Noise Ratio) ・SSIM(Structural SIMilarity Index)	・PESQ(Perceptual Evaluation of Speech Quality) ・POLQA(Perceptual Objective Listening Quality Analysis)
	Reduced Reference (RR)	・ITU-T J.246 ・ITU-T J.249	
	No Reference (NR)	・BRISQUE(Blind/Referenceless Image Spatial Quality Evaluator) ・NIQE(Naturalness Image Quality Evaluator) ・MUSIQ(Multi-scale Image Quality Transformer) ・CLIP-IQA(Contrastive Language-Image Pre-training Image Quality Assessment)	・ITU-T P.563
		・ITU-T P.1201	

品質評価手法には、個々人の主観的判断に基づいて品質評価を行う手法もあるが、評価対象データや評価環境等の前提条件の差異によって評価結果も異なるため、更に再現性のある品質評価結果を得ることを目的として、国際標準化機関である国際電気通信連合(ITU)では評価対象データや評価環境等を含む条件を規定し、主観評価手法に関わる方法論として、ITU-R BT.500(映像)や、ITU-T P.800(音声)等を勧告化している。これらの主観評価手法は、人間の知覚を最も忠実に反映できる一方で、多大な時間や労力、専用の試験設備を必要とするため、実運用ネットワークの継続的な品質監視には適さない。

一方、客観的評価手法については、アプリケーションのメディア信号やサービス／通信に関わる物理的な特徴量から主観品質を推定する手法であり、多大な労力を要することなく客観的な品質評価指標を提供できる。また客観評価手法は、評価に利用する情報に応じてFR、RR及びNRの3種類に分類される。FRは、評価対象データを参照情報と比較し、RRは、評価対象データを、参照情報から抽出した特徴量情報と比較して品質を評価する。例えば映像のアプリケーションであれば、評価対象の映像情報を、参照情報である基準映像と比較して品質を評価する。そしてNRは評価対象データだけで品質を評価する。FRやRRはNRと比較すると、参照情報と比較して品質を評価しているため評価値の確度は高い一方で、評価に当たっては、参照情報が必要になる。本稿では、更に評価値の確度が高いFRによる評価手法を採用した。

4. レイヤー間のデータマッピングの適用例：移動体端末での映像伝送アプリケーション

レイヤー間のデータマッピングに当たって、無線ネットワーク種別(5G(第5世代移動通信システム)、LTE(Long Term Evolution)等)、無線端末・基地局の位置及びエリア特性(都市部、郊外等)等の接続される無線ネットワークシステムの設計条件や、アプリケーションのサービス運用が想定される事業ドメイン情報等、各レイヤーの品質に影響を与える要因を把握する必要がある。

無線端末が移動を伴う場合、無線端末の位置に応じて接続する無線ネットワークが変化し、ネットワーク品質が変動することが想定される(図2左)。そこで、三菱電機では、無線端末と無線ネットワークを介して接続するサーバー装置との間の遅延情報から無線ネットワークの接続状態を判定する手法⁽¹⁾を開発し、検証した。複数無線アクセス環境下では、通信特性の異なる無線ネットワークごとに遅延水準が変化することから、遅延量(移動平均)の時系列データから抽出した特徴量に基づいて、機械学習によって運用時の接続状態(無線ネットワークごとの定常区間・遷移区間)を判定できることを確認した(図2右)。

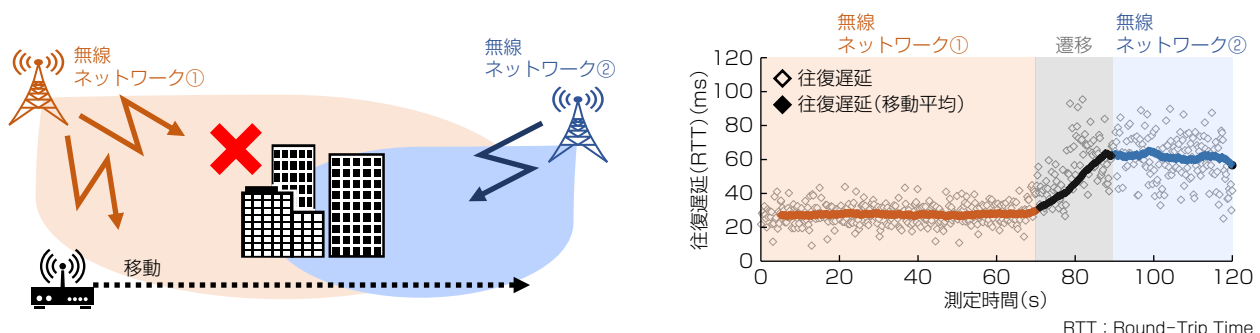


図2-無線ネットワークシステムの設計条件がネットワーク品質(遅延)に与える影響の把握

次に、映像のアプリケーションを対象としてサービス品質に寄与する項目を抽出し、ネットワーク品質やアプリケーションのパラメーターに変化が生じた際のサービス品質への影響を評価し、レイヤー間のデータマッピングを実施した⁽²⁾。このとき、映像アプリケーションのサービス品質を評価するための評価指標としては客観評価手法のFRモデルのPSNRを用いており、値が高いほど劣化が少なく原画像に近いことを示す。

ネットワーク品質とサービス品質間のデータマッピングの検証結果を、図3に示す。この検証ではネットワーク品質としてPERと帯域幅が変化した際のサービス品質への影響について評価した。結果としてPERの増加とともに映像品質は劣化傾向にあることが確認できる。また帯域幅については、PERが0.1%以下の場合、帯域幅の増加とともに映像品質は向上するが、PERが0.5%以上の場合、帯域幅の増加に伴って、欠落するパケット数も増加するため、映像品質は10Mbpsをピークに、帯域幅の増加とともに劣化することを確認した。

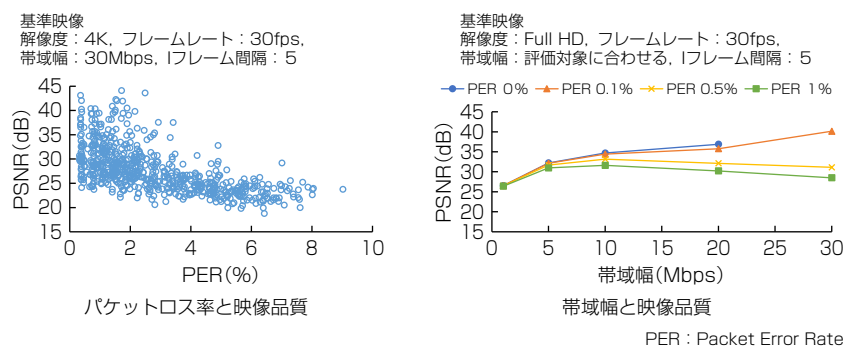


図3-ネットワーク品質とサービス品質間のデータマッピング

アプリケーションパラメーターとネットワーク品質、サービス品質間のデータマッピングの検証結果を、図4に示す。アプリケーションのパラメーターとしては、解像度、フレームレート、Iフレーム間隔を対象として、これらのパラメーターが変化した際のサービス品質への影響について評価した。またネットワーク品質との関係性も合わせて図示するため、PER別にサービス品質の変化をプロットしている。解像度については、基本的に解像度が高いほど映像品質は向上するが、PERの増加に伴って、その勾配は減少傾向にある。またフレームレートについては、PERが固定の場合はフレームレートが上昇するほど映像品質は向上する傾向にある。一方、PERごとに見ると、PERが増加するほど映像品質は劣化する傾向にある。そして、映像のキーフレームであるIフレーム間隔については、PERが0%の場合はほとんど映像品質に影響していない一方で、PERが0.1%以上の場合Iフレーム間隔が長いほど映像品質が劣化する。

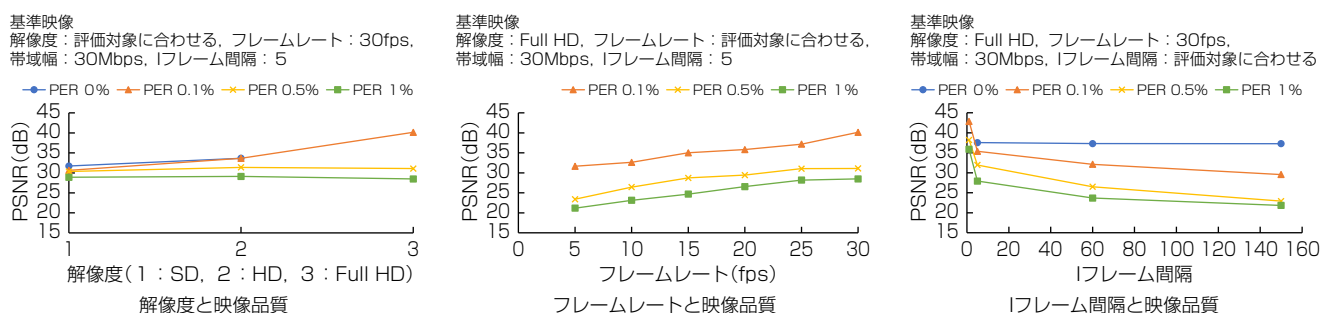


図4-アプリケーションパラメーターとネットワーク品質、サービス品質間のデータマッピング

このように、PERや帯域幅等を含むネットワーク品質や、解像度やフレームレート、Iフレーム間隔等を含むアプリケーションパラメーターの変化による映像のサービス品質への影響を評価し、ネットワーク品質とサービス品質のレイヤー間のデータマッピングを実施した。

5. クロスレイヤー型品質評価結果に基づくアプリケーション・通信制御技術

4章の評価結果に基づいて、アプリケーションのパラメーターや伝送方法に係る通信制御を行うことでUX向上を実現する。当社では、サービス品質の改善に向けたアプリケーションのパラメーター制御技術や、複数無線アクセス環境下での回線切替え、パケット複製による冗長・連送制御、アプリケーション間の優先制御等を含む通信制御技術に関する開発に取り組んでいる⁽³⁾。これらの制御技術を通信状態に応じてアプリケーションごとに適切に選択することでUXを改善させる。この章では、これらのアプリケーション制御技術及び通信制御技術について示す。

移動体(エッジ)側の複数の映像コンテンツが無線ネットワークを介して監視センターに伝送され、監視センター側のユーザー(運用管理者)が配信された複数の映像を確認するユースケースを例に、クロスレイヤー型品質評価結果に基づくアプリケーション・通信制御技術の概要を図5に示す。移動体端末側の移動によって無線ネットワークの通信環境が変化すると、受信パケットの受信タイミングに対するゆらぎやパケットロス等を含む通信品質劣化が生じることでアプリケーションのサービス品質が変化する。ただし、アプリケーションの前提条件によってサービス品質への影響度は異なるため、3章で示したクロスレイヤー型品質評価技術を適用し、レイヤー間のデータマッピングによって構築したモデルを用いて、アプリケーションごとに評価を行う。図5の例では、通信環境の変化によってアプリケーション①に関してはサービス要件を満たせなくなった一方で、アプリケーション②に関してはサービス品質に変化はあるものの、サービス要件を満たしている。このときサービス要件を満たせなくなったアプリケーション①に対して、アプリケーション・通信制御技術を適用する。アプリケーションの制御としては、対象になるアプリケーションは映像であるため、解像度やフレームレート等のパラメーターを制御することが想定される。通信制御としては、無線ネットワークの接続状態に応じて回線切替えや冗長・連送、優先制御等が適用される。アプリケーション・通信制御技術によって、サービス要件に則して通信環境に応じた最適なサービスを提供することで、UX向上を実現する。

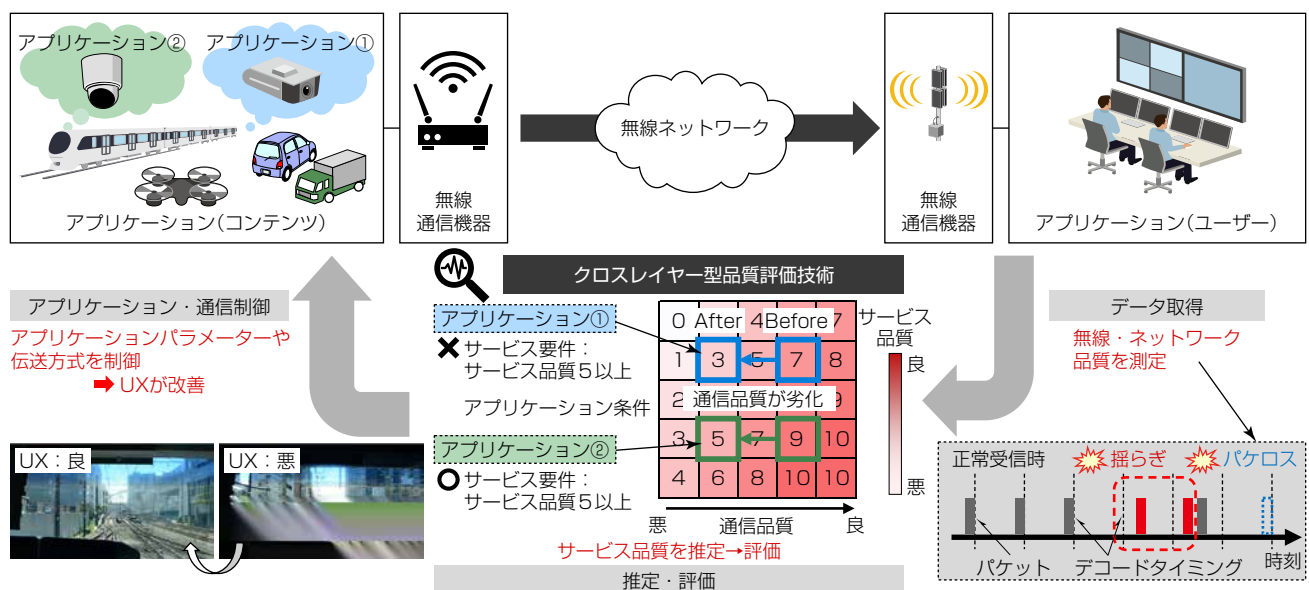


図5-クロスレイヤー型品質評価に基づくアプリケーション・通信制御技術の概要

6. む す び

無線リンクからアプリケーションレイヤーまでを横断的に分析するクロスレイヤー型品質評価技術を活用したネットワークライフサイクルシステムの概要と、このシステムのクロスレイヤー型品質評価技術の評価結果に基づくアプリケーション・通信制御技術の適用によるサービス品質改善指針を述べた。実環境や模擬による取得データから各レイヤーのデータ間の関係性を明確化するとともに、評価結果に基づいて適切な制御手法を選択することでアプリケーションごとに最適な通信環境を実現し、要件に応じたサービス提供に貢献できることを確認した。

参考文献

- (1) 長谷川仁彦, ほか: 複数無線アクセス環境における通信システム特性を考慮した通信品質評価手法の検討, 電子情報通信学会技術研究報告, **125**, No.225, NS2025-131, 1~6 (2025)
- (2) 上吉川直輝, ほか: フレーム種別ごとのパケット欠落が映像品質に与える影響の評価, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-6-59 (2025)
- (3) 長谷川仁彦, ほか: アプリケーションごとの通信品質評価結果に基づくマルチ無線連携制御技術に関する検討, 電子情報通信学会総合大会, B-8-11 (2026)

