

氏 名 Xiaolan Jiang

学位(専攻分野) 博士(情報学)

学位記番号 総研大甲第 2186 号

学位授与の日付 2020 年 9 月 28 日

学位授与の要件 複合科学研究科 情報学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Learning-based Adaptive Video Streaming

論文審査委員 主 査 教授 計 宇生

准教授 福田 健介

准教授 阿部 俊二

准教授 栗本 崇

准教授 金子 めぐみ

教授 甲藤 二郎

早稲田大学 理工学術院

(Form 3)

Summary of Doctoral Thesis

Name in full Xiaolan Jiang

Title Learning-based Adaptive Video Streaming

In recent years, video streaming traffic has been increasing significantly. To satisfy and attract more users, video applications not only struggle with delivering high-quality videos over the Internet, but also develop new types of video streaming scenarios. Recent advances of hardware and network technology have made two new video streaming scenarios, live and 360-degree video streaming, become tremendously popular among users. However, new streaming scenarios are making it more challenging to provide higher user perceived quality of experience (QoE).

In live streaming scenarios, high video quality and low latency are two main requirements. Unlike on-demand video streaming services where only bitrate decisions need to be made by the applications, a live streaming application needs to make more complicated options (e.g. target buffer level, latency limit) to achieve low latency. Moreover, future video chunks' information is unknown in live streaming services, and it leads to a more difficult task to make decisions.

Challenges for streaming high-quality 360-degree videos mainly comes from its excessive need of network bandwidth. To prevent the delivery of entire 360 videos from adversely affecting QoE, tile-based viewport adaptive streaming that divides 360 video chunks into tiles and conveys streams with differentiated quality levels to viewport and non-viewport areas has been regarded as a promising solution.

Existing works have been devoted to the design of viewport prediction (VPP) to predict users' viewport orientation due to head movements, as well as tile bitrate selection (TBS) to determine tile-based bitrates for viewport and non-viewport areas. These two parts are still an open challenge for the research community due to unpredictable user head rotation patterns and large action space.

Our key insight is that learning-based methods can see human-invisible network and user patterns well through a large amount data traces. This allows us to apply learning-based schemes to tackle the challenges in live and 360-degree video streaming scenarios. We formulate the live streaming task as a reinforcement learning problem with discrete-continuous hybrid action spaces, then propose a novel deep reinforcement learning (DRL) algorithm to train a neural agent which can take hybrid actions.

For 360-degree video streaming, we use part of non-viewport areas to help resist prediction errors, and divide all tiles into three areas: viewport, adjacent and out areas. Then we train a TBS agent with DRL to determine bitrate for each tile area. To predict future viewport more accurately, we propose a sinusoidal viewport prediction system

which leverages the sinusoidal values of rotation angles for orientation prediction on *yaw* direction, and utilize the correlation between predictions errors and head movement velocity as well as prediction time window to handle the potential prediction error.

To evaluate the performance of the proposed schemes we conduct extensive simulations based on various categories of videos, and real-world bandwidth and user head motion datasets. Simulation results demonstrate that the proposed schemes achieve better QoE than comparison schemes.

Our main contributions are developing learning-based systems to tackle challenges exposed by the live and 360-degree video streaming services. More specifically, we formulate the live streaming task as a reinforcement learning problem with discrete-continuous hybrid action spaces, then design a novel DRL algorithm-HD3 to solve it. The simulation results show that our scheme can generate a single neural agent which can perform well under various network and video traces. Moreover, this distributed scheme can converge fast and be applied at scale in practice.

To address challenges exposed in the 360-degree video streaming scenarios, we develop two learning-based system for tile bitrate selection and viewport prediction respectively. We tackle the large action space issue in 360-degree video streaming, we divide the tiles into three classes, then apply a DRL algorithm to learn a neural agent to select bitrates for each tile class. We evaluate the proposed scheme-Plato in real-world traces of viewport motion and network bandwidth, and the results show that Plato achieves significant QoE improvement.

To more accurately predict future viewport, we propose a sinusoidal viewport prediction (SVP) system to overcome the periodicity issues on *yaw* direction. Moreover, we find that prediction errors positively correlate with head movement velocities and prediction time window, and utilize this finding to further improve the system performance. Simulation results demonstrate that the SVP system can achieve higher prediction accuracy thus leading to better video quality than comparison schemes.

博士論文審査結果

Name in Full
氏名 Xiaolan Jiang

Title
論文題目 Learning-based Adaptive Video Streaming

本論文は、学習の手法に基づく適応型映像ストリーミングに関する研究内容について書かれている。厳しい遅延要求をもつライブ映像ストリーミングや、高いネットワーク帯域を要する360度映像ストリーミングでは、ネットワーク資源を有効に活用して利用者の要求を満足するための制御が必要である。本研究では、機械学習の手法を用いて、ダイナミックに変化するネットワーク環境に対応して、伝送する映像のビットレートや範囲などを制御することによって、高い利用者体感品質が得られる制御アルゴリズムを見出すことが目的である。

論文は6つの章から構成される。第1章と第2章で研究の背景と各種映像ストリーミングのための利用者体感品質に影響する要素、および既存研究の説明を行い、第3章では学習の手法に基づくライブ映像ストリーミングの方法について述べている。ライブ映像ストリーミングでは、ネットワーク帯域の予測やバッファされた映像の長さや遅延の制限に基づき、ビットレート、再生の速さなどのパラメータを動的に調節しながら、映像の画質、滑らかさ、遅延、途切れやスキップで評価される利用者体感品質を最大にすることが求められる。提案手法では、独自に構成された深層強化学習ネットワークを利用して離散値と連続値のアクションを同時に扱えるようにした。複数のライブ映像シナリオのデータセットで評価した結果、提案方式は他の既存方式や、連続値を離散化する方式よりも高い性能が得られることを示した。

第4章では、学習の手法に基づく360度映像のストリーミング方法について述べている。360度映像の全画面の転送には過度なネットワーク帯域を必要とするため、画面をタイルに分割して、利用者の視聴領域に応じて画質を決めていく方法が有効である。研究では、学習によって視聴者の頭の動きを予測し、全画面を視聴領域、周辺領域、非視聴領域に分けて、強化学習でタイル毎の伝送レートをネットワーク環境に応じて段階的に決める方法を提案した。また、実際の無線ネットワークの帯域変動履歴と利用者の視聴履歴を利用して評価を行い、その有効性を示した。

第5章では、360度映像ストリーミングにおける視聴領域に対するより正確で軽量な予測方法を見出すことが目的である。提案手法では、予測誤差と視聴者の頭の動きの速さの関係に注目して、頭の動く角度を非線形関数（三角関数）で表すことによって予測誤差を減らす方法をとった。さらに線形サポートベクトル回帰による予測誤差に対する評価に基づき、視聴領域の隣接領域の大きさを決め、各タイルに対する視聴確率を求めた。研究では、複数の視聴軌跡データセットを用いて予測方法の有効性を評価し、さらにネットワークの帯域変動履歴を用いた視聴効果について評価を行い、軽量である提案方式は各種の条件設定においてよい効果が得られることを示した。

最後に、第 6 章では結論と研究結果の考察についてまとめ、今後の研究課題と展望を提示した。

なお、本研究の成果として、出願者は主著で専攻の定めるトップ会議論文 1 篇、査読付き国際会議論文 1 篇（ACM MULTIMEDIA 2019 のライブ映像ストリーミングに関するグラウンドチャレンジ 2 位入賞）を発表し、また上記に含まれない研究内容で専攻の定めるトップ会議論文 1 篇、ACM KDD Cup 2019 on Humanity RL Track 6 位入賞、およびその他の成果発表を行っている。

公開発表会では博士論文の章立てに従って発表が行われ、その後に行われた論文審査会では、審査員からの質疑に対して適切に回答がなされた。質疑応答後に審査委員会を開催し、審査委員全員で議論を行った。博士論文審査の結果、本論文の内容は博士論文として十分な水準の研究であると認められ、学位の授与に値すると判断した。