

クラウドゲーミングにおけるトラフィック削減に関する一検討

岡出 紳太朗¹ 石岡 卓将¹ 藤橋 卓也¹ 猿渡 俊介¹ 渡辺 尚¹

概要：クラウドゲーミングでは、従来のゲーム機が担っていた各種ゲーム処理、映像生成をクラウドサーバが担うとともに、生成したゲーム映像をネットワーク伝送する。このとき、ユーザ端末はゲーム映像をデコードするだけで高度なゲーム処理を必要とせず、臨場感あふれるゲームを体験することができる。一方で、クラウドサーバで生成したゲーム映像をユーザそれぞれにネットワークを介して伝送する際、ゲーム映像の解像度や同時参加するユーザ数に応じてトラフィックの増大する。ネットワークを介する映像伝送においては映像符号化技術 H.264/Advanced Video Coding (AVC) などを用いてゲーム映像全体を符号化する方法が用いられるが、映像全体を一様に符号化した場合、限られた帯域下における映像品質の低下が発生する。本稿では、注目領域・非注目領域における適応符号化および共通・非共通領域における伝送方法の制御を提案することでゲーム映像の伝送に要するトラフィック削減を達成する。より具体的には、ゲーム映像のうち、ユーザが注目しやすい映像領域に対して多くのビットを割り当て、その他の領域に対しては限られたビットを割り当てて符号化する。また、複数ユーザが共通のゲームに接続してゲームを体験する場合、それぞれのユーザに対して送信するゲーム映像内に共通の映像領域と非共通の映像領域とが含まれる。提案手法では、共通の映像領域をユーザに対してブロードキャスト伝送することでユーザ間で生じる冗長な映像伝送を抑制する。提案手法による効果を議論するために、実際のゲーム映像を用いて実験評価を実施した。ゲーム映像全体を一様に符号化して伝送する手法に対して、提案手法はトラフィックを約 15% 削減できることがわかった。

1. はじめに

有線ネットワークおよび無線ネットワークの高度化に伴って、ゲーム映像のネットワーク伝送を利活用したクラウドゲーミングサービスが注目されている。従来、ユーザがゲームをプレイするためには、高度な画像処理・映像処理を実現可能な専用のゲーム機器を用意する必要があった。クラウドゲーミングでは、高度な画像処理機構・映像処理機構を有しないユーザ端末に対して、遠隔のクラウドサーバが生成したゲーム映像をネットワークを通じて伝送する。図 1 にクラウドゲーミングの全体像を示す。クラウドゲーミングにおいてユーザ端末は各種ゲーム処理を必要としないため、限られた処理機構を持つ小型端末や携帯端末などで臨場感溢れるゲーム体験が可能となる。

一方で、クラウドゲーミングサーバからネットワークを介してゲーム映像をユーザに伝送するため、トラフィックが増大する。例えば、ゲーム映像の解像度が 4K、フレームレートが 240 [fps] である場合、ゲーム映像を無圧縮のまま伝送するために要するトラフィックは約 48 [Gbps] となる。また、複数のユーザが共通のクラウドサーバに接続して

ゲームをプレイする場合には、それぞれにゲーム映像を伝送するため、ユーザ数に比例してトラフィックが増大する。

映像映像の伝送に要するトラフィックを低減するために、ゲーム映像全体を符号化する方法として、映像符号化技術 H.264/Advanced Video Coding (AVC) [1] などが用いられる。H.264/AVC はビデオフレーム間の差分情報を元にして映像情報を符号化することでゲーム映像の伝送に要するトラフィックを低減する。しかしながら、ゲーム映像全体を一様の品質に符号化した場合、映像伝送に利用可能な帯域に応じてゲーム映像の品質が低下する。ゲーム映像品質の低下は各ユーザの体験品質低下を招く可能性がある。H.265/High Efficiency Video Coding (HEVC) [2] や H.266/Versatile Video Coding (VVC) [3] を導入する方法も考えられる。HEVC を用いて映像符号化を行うことで、H.264/AVC に比べて 20–40% のトラフィック削減を達成できる [4]。一方で、エンコード遅延が著しく増大することから、クラウドゲーミングに挙げられる遅延制約が厳しいアプリケーションへの導入が困難とされている [5]。

本稿では、クラウドゲーミングにおけるトラフィック削減を達成するために、各ユーザの注目点に応じた適応符号化手法と、ユーザ間の共通領域のブロードキャスト伝送手法を組み合わせたゲーム映像伝送手法を提案する。より具体

¹ 大阪大学大学院情報科学研究科

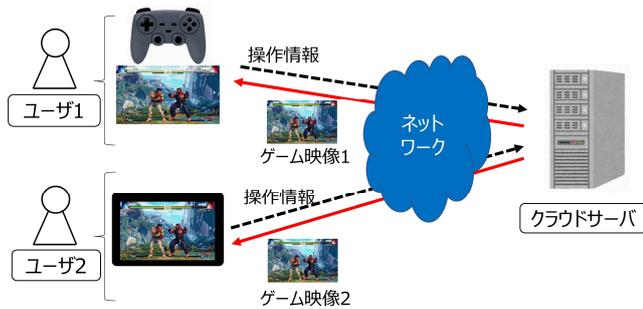


図 1: クラウドゲーミングシステムの全体像

的には、ゲーム映像内にはユーザが注目しやすい領域が含まれることから、ユーザが注目しやすい映像領域に対して多くのビットを割り当てて符号化する。また、複数ユーザが共通のゲームを体験する場合、ゲーム情報のうち、体験品質への影響などを加味してユーザ間で同期がなされるゲーム情報が存在する。同期されたゲーム情報はユーザ間で共通の映像領域として出力される。提案手法ではユーザ間で共通の映像領域をブロードキャスト伝送することで冗長な映像伝送の抑制を図る。

格闘ゲームである Street Fighter V Champion Edition を用いて、注目領域の割合に対する復元品質および共通領域のブロードキャスト伝送に起因するトラフィック削減効果を評価した。評価結果から、クラウドゲーミングサーバが映像伝送に必要なトラフィックを約 15%削減できることが確認された。

2. 関連研究

本研究はクラウドゲーミングを対象としたトラフィック削減手法、ユーザ情報を利用したトラフィック削減手法、複数ユーザ環境におけるトラフィック削減手法に関する研究と関連する。

2.1 クラウドゲーミングにおけるトラフィック削減手法

クラウドゲーミングにおける映像トラフィックを削減するために、ユーザの注目点を抽出して得られたゲーム画面内の注目領域に着目して適応的に映像領域を符号化する研究がなされている [6–8]。これは、ユーザがゲーム画面全体を俯瞰的に閲覧せず、限られた領域のみを注目していること、注目点から離れるにつれて視力が単調減少することに着目している [9]。ゲーム画面内の注目領域を取得した後、注目領域は高品質化、注目領域外は低品質化してゲーム画面を符号化することでトラフィック削減を達成する。既存研究ではゲーム画面内から注目点を推定するために視線追跡装置を利用する方法とゲーム画面のオブジェクトを利用する方法とが検討されている。

文献 [6] では、実際に視線追跡装置を導入して、得られたユーザの視線情報から注目点および注目領域を推定し

ている。また、文献 [7,8] では、リアルタイムの視線情報が利用できない場合において、過去の視線情報をもとにしてゲームアテンションモデル (Game Attention Model: GAM) を構築・利用してユーザの注目点を推定する。例えば、文献 [8] では、ユーザのゲームのスキルレベルに応じて複数種類の GAM を事前に構築する。新たなユーザがゲームに参加した場合、そのスキルレベルに応じて適当な GAM を選択して注目点を推定することで、ユーザの習熟度に応じた推定が可能となる。

文献 [10] では、ゲーム画面に含まれるオブジェクトの座標やオブジェクトに対する関心度合いを入力とする Deep Neural Networks(DNN) を用いて注目領域を推定する DeepGame が提案されている。DeepGame はやり取りされるゲーム映像を元に注目領域を推定するため、ゲームや映像符号化の変更を必要としない。

上述した既存研究は単一ユーザを対象としたゲーム映像の伝送に焦点を当てている。一方で、共通のゲームに複数のユーザが同時接続する場合、ユーザ間での冗長な映像伝送に起因してトラフィックが増大する。本研究では各ユーザに送信するゲーム映像間には共通部分および非共通部分があることに着目して共通部分をブロードキャスト伝送することでユーザ数の増加に起因するトラフィック増加の抑制を図っている。

2.2 ユーザ情報を利用したトラフィック削減手法

映像や画像を利活用したサービスにおいて、ユーザの情報を利用してトラフィックを削減する方法が検討されている [11–13]。例えば、仮想現実 (Virtual Reality: VR) に応用される 360 度映像においては、画面全体を矩形で分割するタイル化が提案されている。タイル化をすることでタイルごとに独立して品質制御が可能となる [12,13]。文献 [11] ではユーザは現在見ている領域とこれから最も見るであろう領域を高ビットレートで、逆にユーザの関心から外れている領域は低ビットレートで符号化する。全ての領域を等しく高品質化した場合と比較して、より少ない帯域消費量で映像品質を維持できることが示されている。

2.3 複数ユーザ下におけるトラフィック削減手法

高解像度映像をネットワークを介して複数ユーザに伝送する場合、トラフィックを削減する方法が検討されている [14,15]。文献 [15] では、多くのユーザは同じ動画を視聴する際に、ある共通領域を集中して視聴していることを示した。文献 [14] では、一つの基地局が複数ユーザそれぞれに映像を伝送せず、複数ユーザが所望するタイルにおいてはマルチキャスト伝送、それ以外のタイルはユニキャスト伝送を用いることで、冗長な伝送を抑制できる。

本研究はマルチキャストによるトラフィック削減効果をク

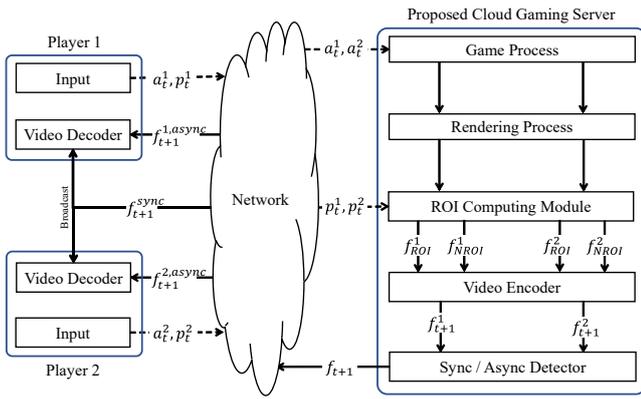


図 2: 提案手法における処理の全体像

クラウドゲーミングにおいて応用したものである。既存研究においては各ユーザの関心の共通部分と非共通部分を加味してマルチキャスト・ユニキャストを導入しているが、提案手法においてはゲーム画面内の共通部分と非共通部分に着目してマルチキャスト・ユニキャストを導入している。

3. 提案手法

クラウドゲーミングを対象とした映像伝送においては、ゲーム映像の高解像度化に起因するトラフィック増大、接続ユーザ数の増加に起因するトラフィック増大を解決する必要がある。本稿ではこれらの課題に対処するため、ゲーム画面内の注目領域に応じた適応符号化手法、ゲーム画面内の共通領域に応じた映像伝送手法を組み合わせた新たなトラフィック削減手法を提案する。

3.1 全体像

図 2 に提案手法の全体像を示す。本稿で対象とするゲームとしてユーザ 2 名による対戦格闘ゲームを想定する。各ユーザはネットワークを通じて共通のクラウドゲーミングサーバに接続する。ユーザ i は時刻 t におけるゲーム画面 $f_t^{(i)}$ にしたがって、自身の操作情報 $a_t^{(i)}$ および注目点 $p_t^{(i)}$ をクラウドゲーミングサーバに対して送信する。クラウドゲーミングサーバは受信した各ユーザの操作情報 $a_t^{(i)}$ に基づいてキャラクタ情報やゲーム情報を更新するとともに、時刻 $t+1$ におけるゲーム画面 $f_{t+1}^{(i)}$ をユーザ i に対して生成する。その後、クラウドゲーミングサーバはゲーム画面 $f_{t+1}^{(i)}$ を映像符号化技術 H.264/AVC を用いて符号化するとともに各ユーザに対して伝送する。このとき、クラウドゲーミングと各ユーザとの間の帯域は R [bps] とした。各ユーザは受信した映像情報を復号して自身の画面上に表示する。

クラウドゲーミングサーバが生成するゲーム画面の解像度は $W \times H$ 画素とする。対戦格闘ゲームの画面は各ユーザが操作するキャラクタ、背景、ゲーム情報をで構成される。一般的に、ユーザ間で生じるキャラクタの位置情報や

ゲーム情報の誤差は体感品質に影響を及ぼすため、クラウドサーバはユーザ間で共通の映像をレンダリングする。一方で、ユーザ間で生じる背景の誤差は体感品質への影響が小さいため、クラウドサーバはユーザ間で異なる映像をレンダリングする。

3.2 注目点に応じた適応符号化

各ユーザは時刻 t におけるゲーム画面 $f_t^{(i)}$ に応じて、ゲーム画面のうち、一部の領域を注目しながらキャラクタを操作する。提案手法では、視線情報やキャラクタの位置情報などを元にしてゲーム画面 $f_t^{(i)}$ のうち、各ユーザの注目点 $p_t^{(i)} = (x_t^{(i)}, y_t^{(i)})$ を取得する。取得した各ユーザの注目点はサーバに対してそれぞれ通知する。その後、サーバは注目点 $p_t^{(i)}$ を中心とする $c_w \times c_h$ 画素の矩形領域 f_{ROI} をゲーム画面内の注目領域 (ROI: Region of Interest), それ以外の領域 f_{NROI} をゲーム画面内の非注目領域 (NROI: Non-region of Interest) として取得する。

クラウドサーバは、注目領域 f_{ROI} および非注目領域 f_{NROI} に対して異なる映像符号化パラメータを設定する。より具体的には、あるユーザに対して映像全体に割当可能なビットレートが R であるとき、注目領域に対するビットレートを R_{ROI} 、非共通領域に対するビットレートを R_{NROI} と定めて映像符号化技術 H.264/AVC を用いてそれぞれ符号化する。このとき、 $R_{ROI} + R_{NROI} \leq R$ を満たす必要がある。また、注目領域はユーザにとって重要な映像領域であることから、注目領域および非注目領域に対するビットレートは、 $R_{NROI} < R_{ROI}$ となるように定める。

3.3 共通領域・非共通領域に応じた映像伝送

提案手法では、ゲーム画面を注目領域・非注目領域に分類すると同時に、注目領域・非注目領域の領域に含まれる共通領域・非共通領域を抽出する。図 3 に、Street Fighter V Champion Edition (CAPCOM Co., Ltd., Japan) を対象とした共通領域・非共通領域の例を示す。例えば、非注目領域に含まれる共通領域としてはゲーム画面上部にある体力ゲージなどが挙げられる。また、注目領域に含まれる共通領域としては各ユーザが操作するキャラクタなどが挙げられる。

図 4 に共通領域・非共通領域の伝送方法を示す。提案手法では、共通領域に含まれるゲーム画面はユーザが共通して必要とするものとして、ブロードキャスト伝送する。一方で、非共通領域に含まれるゲーム画面はユーザそれぞれが必要とするものとして、ユニキャスト伝送する。共通領域が広がるにつれて複数ユーザへのゲーム画面の伝送に要するトラフィックを削減できる。



図 3: 提案手法における領域の分類例. Street Fighter V Champion Edition (CAPCOM Co., Ltd., Japan)



図 4: 提案手法における伝送方式

4. 性能評価

実験環境 ゲーム映像を取得するために本実験ではユーザ端末として DELL G32 台を用意した. ユーザ端末間で 1vs1 のオンライン対戦を実施して各端末上でゲーム映像をキャプチャした. 取得したゲーム映像はデスクトップ PC である GALLERIA ZA9C を用いて映像処理, 映像符号化を実施するとともに映像品質およびトラフィックを取得した. デスクトップ PC の OS は Ubuntu 20.04.3 LTS, CPU は Intel(R)Core(TM) i9-10850K CPU@3.60GHz, GPU は NVIDIA GeForce RTX 3080 を利用した.

映像符号化のソフトウェア デスクトップ PC における映像処理や映像符号化にはフリーソフトウェア ffmpeg を用いた. より具体的には, ゲーム映像全体もしくは注目領域・非注目領域を H.264/AVC で符号化するために `ffmpeg -i filename -r 30 -b:v ${bitrate}` コマンドを使用した.

対象とするゲーム映像 評価対象となるゲーム映像は, CAPCOM [16] の対戦格闘ゲームの Street Fighter V Champion Edition [17] から取得した. 各ユーザはリュウをキャラクターとして選択するものとした. ゲーム映像の解像度は 1920×1080 [px], フレームレート

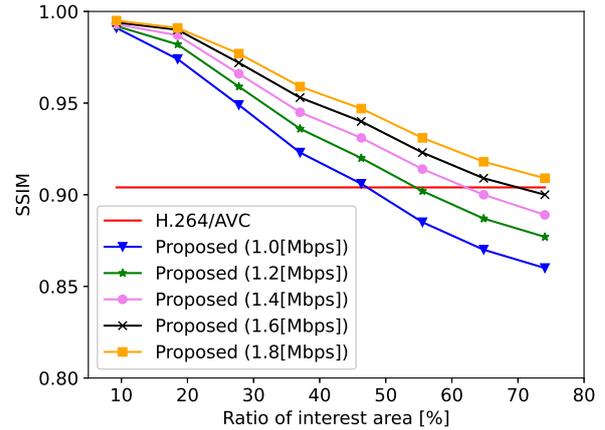


図 5: 映像全体の符号化が 2 [Mbps] の場合と, 提案手法の符号化における注目領域品質の比較

は 30 [fps] とした.

比較手法 比較手法として各ユーザに対してゲーム映像全体を符号化する手法および提案手法を用いた. より具体的には, ゲーム映像全体を符号化する手法では ffmpeg を用いて各ユーザに対するゲーム映像のビットレートを R [bps] に設定する. 一方で, 提案手法では ffmpeg を用いて注目領域に対するビットレート R_{ROI} [bps], 非共通領域に対するビットレート R_{NROI} [bps] が $R_{ROI} + R_{NROI} = R$ となるように設定した. 注目領域である矩形の解像度は $1920 \times h$ [px] とした. ここで, h の範囲について, $h = 100, 200, \dots, 800$ [px] に設定した.

評価指標 評価指標として, 注目領域内におけるゲーム映像の Structural Similarity (SSIM) を導入した [18]. SSIM は元映像と復号後の映像との類似度を示す指標である. SSIM は, 人間の画質劣化の知覚に画像構造の類似度が寄与するものとした指標で, $[0, 1]$ までの値を取る. SSIM 値が 1 であるとき, 元映像と復号後の映像が完全に一致することを表している.

4.1 注目領域の割合に対する復元品質

ゲーム画面内に含まれる注目領域の割合が提案手法の性能にもたらす影響を評価した. 図 5 にクラウドゲーミングサーバと各ユーザとの間の帯域が 2.0 [Mbps] で, ゲーム映像内の注目領域の割合を変化させたときにおける, ゲーム映像全体を符号化する手法の映像品質と提案手法の映像品質を評価した. また, 図 6 にクラウドゲーミングサーバと各ユーザとの間の帯域が 10.0 [Mbps] で, ゲーム映像内の注目領域の割合を変化させたときにおける, ゲーム映像全体を符号化する手法の映像品質と提案手法の映像品質をそれぞれ評価した.

図 5 および図 6 に示した評価結果から次の 2 つのことが

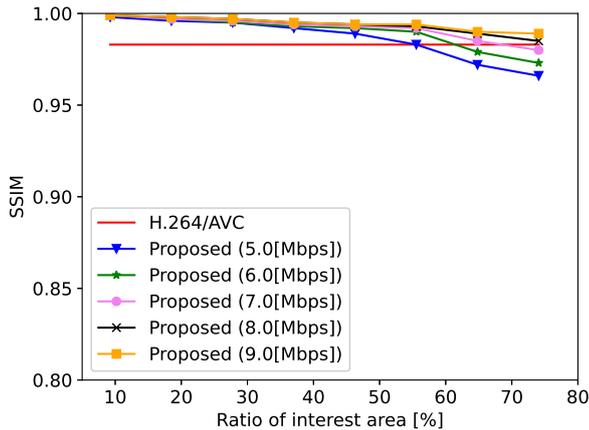


図 6: 映像全体の符号化が 10 [Mbps] の場合と、提案手法の符号化における注目領域品質の比較

わかる。

- 注目領域の割合が小さくなるにつれて提案手法は同程度のトラフィックでゲーム映像全体を符号化する手法と比較して高い映像品質を達成できること
- 帯域が広くなったとき、具体的には、注目領域の割合が 50 %を超えた場合においても、提案手法はより高い映像品質を達成できること。例えば、注目領域の割合がゲーム映像全体のうち約 65 %、帯域が 2 [Mbps] であるとき、提案手法では注目領域に対して約 1.6 [Mbps] 以上を割り当てた場合、高い映像品質が達成できることが示されている。

4.2 共通領域のブロードキャスト伝送に起因するトラフィック削減効果

本節では注目領域・非注目領域に含まれる共通領域の割合がトラフィック削減効果にもたらす影響を評価する。ここで、ゲーム映像内の注目領域の割合は 65 %、すなわち、 1920×750 [px] に固定した。また、注目領域に対して 2 通りの方法でビットレートを割り当ててその差を評価した。方法 1 では、注目領域に対して割り当てたビットレートを 1.6 [Mbps]、非注目領域に割り当てたビットレートを 0.4 [Mbps] とした。このとき、比較手法として、ゲーム映像全体を符号化する手法 (H.264/AVC) のビットレートは、提案手法の注目領域と非注目領域に割り当てたビットレートの和の 2.0 [Mbps] である。方法 2 では、注目領域に対して割り当てたビットレートを 9.0 [Mbps]、非注目領域に割り当てたビットレートを 1.0 [Mbps] とした。このとき、比較手法 H.264/AVC のビットレートは、方法 1 と同様に、10.0 [Mbps] である。また、比較手法である H.264/AVC に加えて、非注目領域における共通部分だけを考慮してブロードキャスト伝送した手法 NROI-broadcast を用意した。

図 7 に方法 1、図 8 に方法 2 に従ってビットレートを

表 1: Street Fighter V における領域別の解像度

Street Fighter V		解像度 [px]	
ゲーム画面全体		1920 × 1080	
注目領域	全体	1920 × 750	
	共通領域	左下バー	472 × 94
		右下バー	468 × 99
	リュウ	405 × 639	
非注目領域	全体	1920 × 330	
	共通領域	上バー	1920 × 183

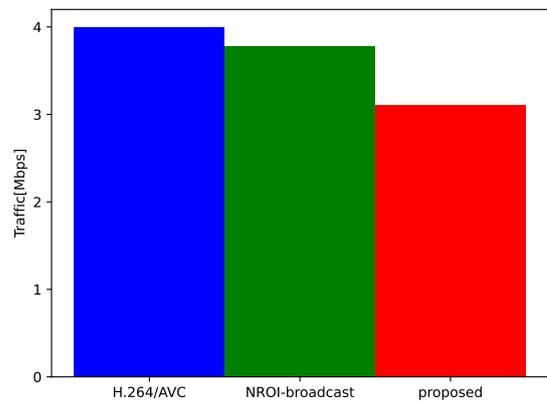


図 7: 映像全体の符号化を 2 [Mbps]、提案手法の注目領域を 1.6 [Mbps] で符号化した場合のトラフィック

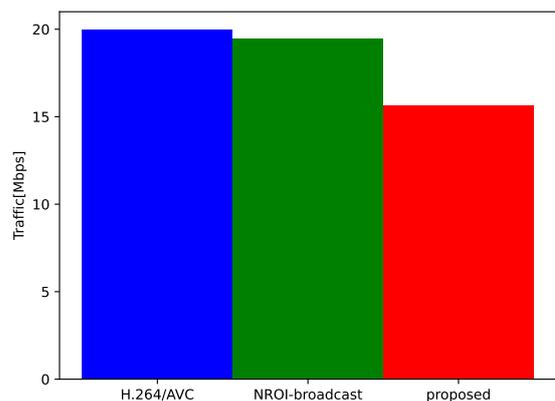


図 8: 映像全体の符号化を 10 [Mbps]、提案手法の注目領域を 9 [Mbps] で符号化した場合のトラフィック

割り当てた場合における既存手法と提案手法のトラフィック削減効果を示す。注目領域に含まれる共通領域の割合は表 1 に示すゲーム映像内のキャラクタ領域などを元に約 42.2 %、非注目領域に含まれる共通領域の割合はゲーム映像内の体力ゲージなどを元に約 55.5 % と定めた。

評価結果より以下の 3 つのことがわかる。

- 提案手法は共通領域のブロードキャスト伝送を実現することでクラウドゲーミングサーバが映像伝送に必要なトラフィックを約 15 %削減できること
- 図 7 と図 8 の H.264/AVC と NROI-broadcast より、非注目領域におけるブロードキャスト伝送はトラフィック削減効果が小さいこと
- より多くのビットレートが割り当てられている注目領域に対するブロードキャスト伝送は効果が高いこと

5. おわりに

本稿では、クラウドゲーミングサーバがユーザ端末に映像を送信する際に生じるトラフィックを削減するために、注目点に応じた適応符号化および共通領域・非共通領域に応じた映像伝送を組み合わせた手法を提案した。

評価結果から、ゲーム映像全体を符号化する手法と比較して、提案手法は共通領域のブロードキャスト伝送を実現することでクラウドゲーミングサーバが映像伝送に必要なトラフィックを約 15 %削減できることが分かった。また、非注目領域のみにおける共通領域のブロードキャスト伝送はトラフィック削減効果が小さいが、より多くのビットレートが割り当てられている注目領域における共通領域のブロードキャスト伝送は効果が高いことも分かった。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 (JP19H01101, JP22H03582), NTT 研究所の支援の下で行った。

参考文献

- [1] T. Wiegand, G.J. Sullivan, G. Bjontegaard, and A.K. Luthra, "Overview of the H.264/AVC video coding standard," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol.13, no.7, pp.560–576, Aug. 2003.
- [2] J.R. Ohm, G.J. Sullivan, H. Schwarz, T.K. Tan, and T. Wiegand, "Comparison of the coding efficiency of video coding standards—including high efficiency video coding (HEVC)," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol.22, no.12, pp.1669–1684, Oct. 2012.
- [3] B. Bross, Y.K. Wang, Y. Ye, S. Liu, J. Chen, G.J. Sullivan, and J.R. Ohm, "Overview of the versatile video coding (VVC) standard and its applications," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol.31, no.10, pp.3736–3764, Aug. 2021.
- [4] K. Misra, A. Segall, M. Horowitz, S. Xu, A. Fuldseth, and M. Zhou, "An overview of tiles in HEVC," *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol.7, no.6, pp.969–977, Dec. 2013.
- [5] 鈴木輝彦, 高村誠之, 中條健, H.265/HEVC 教科書, インプレスジャパン, Oct. 2013.
- [6] G.K. Illahi, T.V. Gemert, M. Siekkinen, E. Masala, A. Oulasvirta, and A. Ylä-Jääski, "Cloud gaming with foveated video encoding," *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications*, vol.16, no.1, Feb. 2020.
- [7] H. Ahmadi, S.Z. Tootaghaj, M.R. Hashemi, and S. Shirmohammadi, "A game attention model for efficient bit rate allocation in cloud gaming," *Multimedia Systems*, vol.20, pp.485–501, Apr. 2014.
- [8] H. Ahmadi, S.Z. Tootaghaj, F. Pakdaman, M.R. Hashemi, and S. Shirmohammadi, "A skill-based visual attention model for cloud gaming," *IEEE Access*, vol.9, pp.12332–12347, Jan. 2021.
- [9] B.A. Wandell, "chapter-2-image-formation," Available at: <https://foundationsofvision.stanford.edu/chapter-2-image-formation/> [Accessed 10 Feb 2022].
- [10] O. Mossad, K. Diab, I. Amer, and M. Hefeeda, "DeepGame: Efficient video encoding for cloud gaming," *Proceedings of the 29th ACM International Conference on Multimedia*, pp.1387–1395, Association for Computing Machinery, Oct. 2021.
- [11] M. Hosseini, and V. Swaminathan, "Adaptive 360 vr video streaming: Divide and conquer," *2016 IEEE International Symposium on Multimedia (ISM)*, pp.107–110, 2016.
- [12] M. Graf, T. Christian, and C. Mueller, "Towards bandwidth efficient adaptive streaming of omnidirectional video over http: Design, implementation, and evaluation," *Proceedings of the 8th ACM Multimedia Systems Conference, MMSys 2017*, pp.261–271, 2017.
- [13] P.R. Alfance, J.F. Macq, and N. Verzijp, "Interactive omnidirectional video delivery: A bandwidth-effective approach," *Bell Labs Technical Journal*, vol.16, pp.135–147, 2012.
- [14] C. Guo, Y. Cui, and Z. Liu, "Optimal multicast of tiled 360 vr video in OFDMA systems," *IEEE Communications Letters*, vol.22, pp.2563–2566, Oct. 2018.
- [15] Y. Bao, T. Zhang, A. Pande, H. Wu, and X. Liu, "Motion-prediction-based multicast for 360-degree video transmissions," *2017 14th Annual IEEE International Conference on Sensing, Communication, and Networking (SECON)*.
- [16] "Capcom," Available at: <https://www.capcom.com/> [Accessed 6 Feb 2022].
- [17] "STREET FIGHTER," Available at: <https://streetfighter.com/> [Accessed 6 Feb 2022].
- [18] Z. Wang, A.C. Bovik, H.R. Sheikh, and E.P. Simoncelli, "Image quality assessment: from error visibility to structural similarity," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol.13, no.4, pp.600–612, Apr. 2004.