

# エッジコンピューティングの利用を想定する VR システムの提案

2018SE102 山田裕介

2018SE103 梁川耕平

指導教員：宮澤元

## 1 はじめに

近年、Virtual Reality(VR) 環境を体験することのできる VR デバイスが普及してきている [1]. VR デバイスには、ホストとなる PC やゲーム機と接続して利用するものと、デバイス自体に計算機を搭載するものがある. 前者はデバイス自体に計算機を搭載する必要がない分、VR デバイスは廉価であるが、利用する上で外部の計算機が必要で VR システム全体としては手軽に利用できるとは言えない. 後者は VR システムとしては廉価に利用できるが、一般に VR デバイスに搭載されている計算機の性能は PC などに比べて低く、負荷が高い VR 処理を行うことができない.

VR 処理の負荷を VR デバイス外部にオフロードして、クラウドコンピューティングを利用して VR 処理を行うクラウド VR システムが提案されている [2]. これにより、利用者側に PC などの計算機を用意する必要がなくなる上、VR デバイス自体に搭載される計算機の処理性能にとらわれず高品質な VR 処理を行うことができる. しかし、クラウドとの通信レイテンシが大きくなると利用者の動きと VR 映像とのずれが大きくなり、VR 体験を損なう可能性がある.

クラウドコンピューティングにおけるレイテンシの問題に対して、エッジコンピューティングを用いる方法がある. これを VR システムに適用すれば、利用者からネットワーク的に近い場所に設置されるエッジサーバを利用することにより、クラウド VR と比べて小さい通信レイテンシで VR 処理をオフロードすることができる. 一方、エッジサーバとして利用できる計算機の性能はさまざまであり、VR のレンダリング処理をオフロードするのに十分かどうかは検討する必要がある. VR のレンダリングに必要な計算機性能がエッジサーバの性能を超過する可能性がある. また、エッジサーバが VR レンダリングに十分な性能を持つ場合でも、複数の VR デバイスの処理がオフロードされることにより、エッジサーバの計算リソースが不足することもありうる.

本研究の目的は、VR のレンダリングにエッジコンピューティングを利用するエッジ VR を実現するために、エッジサーバの計算能力と VR レンダリングの品質の関係をモデル化することである. 本研究では、エッジ VR を実現するために以下の 2 つのアプローチを検討する.

- VR デバイスのエッジサーバへの接続時に、エッジサーバの計算性能の情報を取得もしくは計測し、その性能に見合う品質でレンダリング処理をオフロード

する

- VR デバイスとエッジサーバとが接続されている間、エッジサーバのリソース使用率を監視し、それに応じてレンダリング処理の品質を動的に変動させる

本稿では、エッジサーバの計算性能や計算リソース量と VR レンダリング品質の関係を実験により明らかにする. 研究課題は以下の 2 点である.

- エッジサーバを用いてレンダリング処理を行う VR システムの試作
- エッジサーバの計算能力と VR レンダリングの品質との関係のモデル化

## 2 研究の背景

本節では、研究の背景として VR デバイスの現状とクラウド VR に関して述べる. また本研究の想定環境についても示す.

### 2.1 VR デバイスの現状

VR は、ヘッドマウントディスプレイ (HMD) と呼ばれる左右の目の視差を用いた立体映像を表示するためのデバイスと、仮想空間に対して操作を加えるコントローラを使って体験するのが一般的である. また、HMD とは、頭部に装着するデバイスであり、ディスプレイとレンズ、センサなどを搭載している. 現在よく使われている VR デバイスは、次の 2 種類の利用形態に区分することができる.

- PC やゲーム機と VR デバイスとをケーブルで繋いだ、有線で VR を体験するもの.
- ケーブルを使わない、無線で VR を体験するもの.

この 2 種の利用形態のうち、Steam 上で利用されている VR デバイスは前者の方が多数派であり、主流である [3]. しかし、有線の VR デバイスの使用時の特有の問題として、次のことが挙げられる.

- ケーブルが PC やゲーム機に繋がれていることで、動きや行動範囲が制限されてしまう点.
- 足元が見えないことで、ケーブルに引っかかって転倒したり絡まったりすることがある点.
- 有線の VR デバイスを利用するのに要求される PC の性能は高いことが多く、VR システム全体として比較的多くのコストが必要になる点.

故に、快適な VR 体験をするという点においては、上記のようなことが起こらない無線の VR デバイスを使うのが好ましいと考えられる.

## 2.2 先行研究

先行研究 [2] では、クラウドコンピューティングを利用した VR システムのレンダリングの軽量化を行っている。クラウドコンピューティングを用いてリアルタイムに VR の映像をレンダリングすると、通信レイテンシが大きいので HMD を動かしたときに映像の遅延が発生してしまう。この先行研究では、利用者の HMD の視野よりも大きな視野をあらかじめレンダリングすることで利用者が頭を動かしたときに最後に受信したフレームを局所的に回転させることを可能にし、サーバから更新されたフレームを受信する前に、利用者がレンダリングされていないコンテンツにさらされることを防ぐという手法を提案している。これにより、頭の回転に伴う遅延をローカルデバイスの操作のみで低減することができる。

## 2.3 想定するエッジ環境と利用環境

本研究のエッジ VR システムは、テーマパークや公園程の広さの場所で、その施設の中でどこでもつながるように複数のエッジサーバを配置し、VR デバイスを利用することを想定する。

エッジサーバの性能は基本的に VR のレンダリング処理ができる最低限の性能を持っているものとする。また、サーバによって処理性能やメモリ量が異なることや、1つのエッジサーバに接続する VR デバイスの数が常に変動することを想定する。エッジコンピューティングを利用して処理をオフロードすることで、VR デバイスの性能を高くする必要がないため、1台あたりの VR デバイスにかかるコストを少なく実現することができる。

一方で、VR デバイスは動き回る利用者の近くにあるエッジサーバに接続することを想定しているので、1台のサーバに接続される VR デバイスの数が1台から数十台まで変化する可能性があり、エッジサーバで利用可能な計算リソース量も変動することが想定される。エッジサーバに接続される VR デバイスが少数の時であればデバイスは快適に動作するが、接続台数が増加するとエッジサーバの計算リソース量が不足しレンダリング処理が間に合わずデバイスが快適に動作しないといった状況も発生しうる。

## 3 提案手法

本研究では、VR のレンダリング品質を動的に変更することで、エッジサーバの性能の差異や計算リソースの変動に対応するエッジ VR システムの構築を試みる。

### 3.1 エッジサーバを用いた VR レンダリング

VR デバイスを利用する上で、無線かつ低遅延で比較的重い計算処理をするために、エッジコンピューティングを利用した VR システムとして、図 1 に示すように VR の映像のレンダリング処理をエッジサーバにオフロードする。VR デバイスとエッジサーバを無線で接続し、VR デバイス側から頭の位置や首の動き、コントローラでの操作など

の情報をエッジサーバ側に送り、それを受け取ったエッジサーバはそれをもとに VR 映像のレンダリング処理を行う。その時、レンダリング処理を行うエッジサーバの計算機の性能が、接続するサーバによって異なるケースが想定される。その場合、エッジサーバに接続する際にそのエッジサーバのもつ計算機の処理性能を計測・取得しその処理性能に合わせてレンダリングの画質を決めることで、処理落ちを回避して VR デバイスを動作させることが必要である。

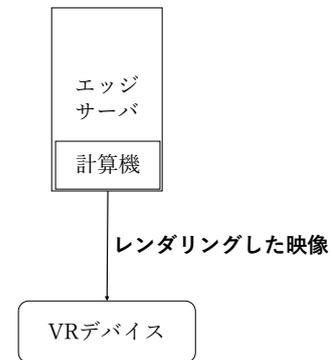


図 1 レンダリング処理をエッジサーバにオフロードする

### 3.2 VR レンダリング品質の動的変更

提案手法では、エッジサーバの性能の差異や計算リソースの使用率に応じてレンダリングの処理の品質を変更することで、レンダリング処理の遅れを回避することを目指す。エッジサーバの性能が低かったり、利用可能な計算リソース量が少ない場合には、レンダリング品質を下げることにより、VR 映像送信のリアルタイム性をできるだけ確保する。

具体的な提案手法としては、VR デバイスのフレームレートの値が落ちた時それに合わせてレンダリングする画質を下げることでフレームレートを回復させる。動的にエッジサーバの計算リソースの使用率を監視し、リソースに余裕がなくなったらそれに合わせてレンダリングの画質を下げるという方法である。そこで問題となるのが、どの程度フレームレート値が落ちた時にどの程度レンダリングの画質を下げることで最適なパフォーマンスが行えるのか。また、どの程度エッジサーバの計算リソースが圧迫されると、どの程度レンダリングに影響してくるのか。これらを知る必要があることである。それを実験によって規則性を導き、動的に VR デバイスのフレームレートやエッジサーバの計算リソースを取得し、それに合わせてレンダリングの画質を変化させるプログラムを、エッジコンピューティングを用いた VR システム組み込むことで解決できると考える。

## 4 実装

本節では提案手法を実装した試作システムについて述べる。

### 4.1 VR 環境の実装

VR デバイスとして META 社の Oculus Quest 2 を用意した。VR 環境の開発は、WindowsOS 上に Unity をインストールし、バージョン 2020.3.15f2 で行った。

さらに、VR 環境を構築するためのアセットとして、Oculus Integraion をインポートした。本研究中に作成したプログラムは、Unity 上のオブジェクトにアタッチされ、プログラミング言語は全て C# で記述されている。

### 4.2 VR デバイスをエッジサーバに接続

VR デバイスをエッジサーバに接続する際、その 2 つの間はなんらかの接続方式で無線接続がなされることを想定する。本研究では、実装環境にて記述した性能のコンピュータをエッジサーバ、及びエッジサーバ中の計算機に見立てることで再現する。また、Oculus アプリケーションの機能である Oculus Air Link を使用して Oculus Quest 2 を PC と無線で接続することで、VR デバイスがエッジサーバと無線接続する状況を再現している。

## 5 実験

VR デバイスが快適に動作するためのレンダリング品質とエッジサーバの性能の関係をモデル化するために、試作システムを用いた実験を行った。

### 5.1 実験環境

Oculus Quest 2 と接続した PC の仕様を表 1 に示す。

表 1 PC の性能

OS	Windows10 Pro
CPU	Intel Core i7-4790K@4.00Ghz
CPU コア数	8 つ
メモリ	32GB
CPU	NVIDIA Geforce GTX 970

### 5.2 プログラム上で解像度を下げることでの計算負荷の軽減を確かめる実験

レンダリング処理の計算量を調整して VR 映像のフレームレートの値をある一定値 72Hz[4] までに回復・維持させるには、解像度を落とすことで実現できると考えた。「解像度を落とすことで VR 映像のフレームレートの値を十分に回復させることができる」という考えが実際に有効であるかどうかを確かめるために、次の実験を行った。

- 90Hz でのレンダリング中に CPU 周波数に上限を設け、フレームレートの値がある一定値を維持できなくなるまで制約を厳しくする。

- プログラム上でレンダリング解像度を下げることで、レンダリング計算負荷を徐々に軽減させる。
- フレームレートの値が、ある一定値より回復したら、レンダリング解像度の低下を止める。

こうして実験を行った結果が、表 2 である。

表 2 各制限段階におけるフレームレート平均値

段階	CPU 周波数 GHz	フレームレート平均値 Hz
1	4.18 (省略)	90.29
14	1.28	88.50
15	0.98	86.02
16	0.78	50.62

制限 16 段階目では、フレームレートがある一定値である 72Hz を下回り続けたため、プログラムによって解像度は下げられたが、72Hz まで回復しなかった。このことから、「解像度を落とすことで VR 映像のフレームレートの値を十分に回復させることができる」という考えは有効ではない事が分かった。

### 5.3 Oculus アプリ上で設定できる解像度全てに関する計算負荷の度合いを確かめる実験

前項の結果を見ると、CPU 周波数の制限の具合でフレームレートの値に境目が存在する可能性がある。境目がどこまでなのかを判明すれば、どの程度の CPU の性能があれば VR 映像の安定したレンダリングが可能なのかを判断するための大きな手掛かりになる。それを確かめるため、次の実験を行った。

- 120Hz でレンダリング中、CPU 周波数に制限を設け、その制約を徐々に厳しくする。
- 制約を厳しくする最中、フレームレートの値を記録し、制約の各段階ごとにその平均値を算出する。
- 解像度 20 通り全てに対して上記の計測を行う。

この実験の結果は、制約を厳しくするにつれて、時間内にレンダリングを完遂できなくなるため、制約が厳しくなると同時にフレームレート値も小さくなることが予測される。その実験結果が、表 3 であり、余白が無いので重要な部分のみを抜粋している。

表 3 から、「解像度が 4128x2096 より大きくなると、約 120Hz を維持していたフレームレート値が大体半分にまで落ちるのは何故か」という疑問点が浮かび上がる。

### 5.4 基本フレームレートを維持できなくなるとフレームレート値が半分になることを確かめる実験

Quest 2 が設定することのできる別のフレームレート値で同様の実験をし、値の変化を見ることで、前項の疑問点を解消できるのではないかと、それを確かめるために、以下の実験を行った。

表3 フレームレート平均値 Hz

段階	CPU 周波数 GHz	解像度	
		4128x2096	4192x2128
1	4.18	121.07	59.92
		(省略)	
13	1.48	107.05	60.44
14	1.28	117.09	59.90
15	0.98	68.31	57.09
16	0.78	57.99	54.44

- 前実験での基本フレームレートの値を 72Hz, 80Hz, 90Hz に設定する.
- 同様の実験を行い, フレームレート値を記録する.

この実験を行った結果が表4であり, 重要な部分のみを抜粋している.

表4 フレームレート平均値 Hz (72Hz の場合)

段階	CPU 周波数 GHz	解像度	
		4480x2256	4704x2384
1	4.18	72.20	36.03
		(省略)	
14	1.28	72.10	36.08
15	0.98	71.17	36.23
16	0.78	69.16	34.51

### 5.5 ここまでの実験の考察

表4を見ると, 観測した値には, 境界の前後で基本フレームレート値の半分の値を取る規則性が存在することが分かる. 他の基本フレームレート値の場合も同様の規則性がみられた.

このことから, 処理が間に合わない時のフレームレート値は基本フレームレート値の半分となる仕様が, Unity や Oculus Quest 2 などに存在する可能性が高いと言える.

### 5.6 コア数を制限することでかかる計算負荷の度合いを確かめる実験

CPU 周波数の制限の度合いによってフレームレート値に境目が存在する可能性があることが分かった. CPU のコア数でも同じような現象が発生するかが分かれば, CPU 周波数と CPU コア数と計算負荷との相関関係を導く大きな手掛かりとなるはずである. こうして, CPU 周波数とコア数に制限をかけることでフレームレートの遷移を確認する実験を行った. その結果が, 表5である.

結果からは今までの実験で見られた規則性は見られず, 制限が厳しくなるにつれて滑らかにフレームレートが落ちる様相となった.

表5 フレームレート平均値 Hz(解像度が 2784x1408 の場合)

段階	コア数				
	...	4	3	2	1
1	...	119.05	119.28	119.41	121.49
		(省略)			
11	...	117.04	120.61	118.32	113.25
12	...	118.72	117.19	116.48	95.56
13	...	118.69	119.80	107.74	78.53
14	...	109.66	112.11	76.90	65.82
15	...	64.14	70.04	59.85	52.10
16	...	57.36	57.67	51.44	36.03

## 6 まとめと今後の課題

本研究では, エッジコンピューティングを用いて VR 体験を行う「エッジ VR システム」を構築するために必要となる情報であるエッジサーバの計算機の性能を, 解像度, CPU 周波数, CPU のコア数の3点から測定する実験を行った.

しかし, いくつかの実験を行った結果からは, ある規則性を見出しただけであった. ゆえに, 本研究の目標であった「エッジサーバの計算能力と VR レンダリングの品質の関係のモデル化」や「エッジコンピューティングを用いてレンダリング処理を行う VR システムの構築」は不完全なままとなった.

並列に処理を行うエッジサーバとして利用する PC の数を増やしたり, 処理を分割して並列に行う実験をしたりすることで, 本研究の求めるものに近い VR システムで実験を行い, その有効性を確かめることが今後の課題である.

### 参考文献

- [1] 河野 央, 武永 拓, 瀧 健太, 江藤 信一, “HMD 型 VR が誘発する感覚の変化とその可能性,” in 久留米工業大学研究報告 41 号, pp.92-100, 2019.
- [2] Abbas Mehrabi, et al. , “Multi-Tier CloudVR: Leveraging Edge Computing in Remote Rendered Virtual Reality,” *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications*, Vol.17, No. 2, pp.1-24, 2021.
- [3] Steam, “Steam ハードウェア & ソフトウェア調査: August 2021,” <https://store.steampowered.com/hwsurvey/Steam-Hardware-Software-Survey-Welcome-to-Steam?l=japanese> (2021/09/21 access).
- [4] Shaun W Jerdan, et al. , “Head-Mounted Virtual Reality and Mental Health: Critical Review of Current Research’’. *JMIR Serious Games*, Vol.6, No3, e14, pp.13-24, 2018.