

特別研究報告

題目

VR サービスにおけるインタラクティブ性を向上する
エッジクラウド連携手法の提案と評価

指導教員

村田 正幸 教授

報告者

赤坂友輝

2022年2月8日

大阪大学 基礎工学部 情報科学科

内容梗概

VR (Virtual Reality: 仮想現実) 技術の向上や VR 機器の普及に伴って、VR を用いたサービスへの注目が高まり様々な VR サービスが新しく登場している。特に Covid-19 の影響により現実世界での活動が難しくなった今、人々の精神面を支えるためにも VR サービスを用いた他者との交流が注目されている。VR 空間内で他者との交流を円滑に行うためにはユーザ同士のインタラクティブ性を高める必要があり、そのためには VR 空間の情報処理を高速化することが重要である。

マルチアクセスエッジコンピューティング (MEC) 技術は、利用者に近い拠点にサーバを設置しコンピューティング資源として利用する技術であり、サーバまでの物理的遅延が削減されることによる通信の低遅延化が期待できる。しかし近年は、クラウドを用いた情報通信の遅延も短縮化されつつある。従って、VR サービスの情報処理内容や利用者が感じる VR サービスの品質にもとづいて、エッジを使用する効果が十分に得られないことも考えられ、VR サービスの情報処理内容を踏まえつつ適切なエッジ・クラウド連携を図る必要がある。

そこで、本報告では、ユーザ同士の交流の情報処理を伴う VR サービスを実機に実装し、実装した VR サービスを用いて MEC サーバによる通信遅延削減によるインタラクティブ性の向上度を測定する。ユーザの交流を伴う VR サービスでは、VR 空間内オブジェクト情報の位置同期処理および VR オブジェクトの配布処理が必要となる。そのため、これらの情報配置および情報処理を、クラウドサーバで行った場合と MEC サーバで行った場合のインタラクティブ性を評価しつつ、インタラクティブ性を高める VR 空間の情報処理のエッジ・クラウド連携の指針を得る。評価の結果、MEC サーバを用いることでユーザの入力が他のユーザに反映されるまでの遅延が 41.8% 高速化され、VR オブジェクトのデータダウンロード時間では約 50% の削減が実現できることが明らかとなった。また、VR オブジェクトのデータダウンロード時間は削減されるものの、VR サービスの体感品質向上への効果が低いこともわかった。これらの結果から、データサイズが大きい VR オブジェクトの配布をクラウドサーバが行い、VR オブジェクトの位置同期処理をエッジサーバで行うエッジ・クラウド連携が効果的であることがわかった。

キーワード

MEC (Multi-Access Edge Computing)、クラウド、エッジクラウド連携、VR (Virtual Reality)、メタバース

目次

1	はじめに	6
2	エッジクラウド連携手法の提案	8
2.1	想定するサービス	8
2.2	構築する VR サービスシステム	8
3	MEC を利用した VR サービスの実装	12
3.1	VR 空間管理	12
3.2	オブジェクトモデルの管理	14
3.3	実装サービスの動作例	14
4	VR サービスにおけるエッジクラウド連携手法の評価	16
4.1	インタラクティブ性	16
4.2	実験環境	16
4.3	評価方法	17
4.4	評価結果	20
4.5	エッジクラウド連携手法	23
5	おわりに	26
	謝辞	27
	参考文献	28

目 次

1	サービス利用図	9
2	VR サービスシステム	10
3	VR サービスへのアクセス手順	11
4	VR 空間管理サーバ	12
5	座標情報の同期 (ユーザ 1 が入力を与えた場合)	13
6	アプリケーションの動作例 (ユーザ視点)	15
7	アプリケーションの動作例 (他ユーザと商品を選んでいる様子)	15
8	ネットワーク構成	17
9	オブジェクトの座標誤差の評価	19
10	データオブジェクト	19
11	オブジェクトの座標誤差 (5G-MEC シナリオ)	21
12	オブジェクトの座標誤差 (5G-Cloud[slow] シナリオ)	21
13	オブジェクトの座標誤差 (5G-Cloud[fast] シナリオ)	22
14	オブジェクトの座標誤差 (B5G-MEC シナリオ)	22
15	低ポリゴン、高ポリゴンオブジェクトを統合した VR 空間例	25

表 目 次

1	遅延シナリオ	17
2	オブジェクトデータサイズ	18
3	座標情報反映遅延	20
4	VR オブジェクトのダウンロード時間	23

1 はじめに

VR (Virtual Reality: 仮想現実) 技術の向上や VR 機器の普及に伴って、VR を用いたサービスへの注目が高まり様々な VR サービスが新しく登場している。特に Covid-19 の影響により現実世界での活動が難しくなった今、人々の精神面を支えるためにも他者との交流が可能な VR サービスが重要視されている [1]。具体的な VR サービス例としては、VR 空間内で複数のユーザが互いに会話することができるもので、ユーザが VR 空間内で会議を行う場所を提供する事を目的としたサービス [2] や、VR 空間内で音楽ライブ体験が行えるサービス [3,4] など VR 空間内で現実同様に多種多様な体験ができるようになっている。他にも、ウェブページを用いた商品販売と比較して現実に近いショッピング環境を体験できることや、物理的な店舗と比較して時間や空間の制約を受けずにサービスを提供できるなどの理由から VR ショッピングサービスを提供する企業が増加している [5]。

様々な企業が VR サービスを提供している現在、ユーザに受け入れられ広く普及するための要件としてユーザの満足度が高くなるようなサービスを提供することが求められるようになってきている。VR ショッピングサービスを利用したユーザに対する調査によるとユーザは VR ショッピング体験による新しい商品の発見と並んで VR 空間内での他者との交流を重要視している [6,7]。

VR 空間内での他者との交流を円滑に行うためにはユーザ同士のインタラクティブ性を高める必要があり、そのためには VR 空間の情報処理を高速化することが重要である。そこで本報告では、マルチアクセスエッジコンピューティング (MEC) 技術 [8] に着目する。クラウドサービスを利用する場合、VR 空間情報の管理はクラウドサーバで行われる。この場合、VR サービスを利用するすべてのユーザはクラウドサーバと通信を行うが、クラウドサーバまでの物理的遅延の増大やユーザ数が多い場合にクラウドサーバへのアクセスが集中し通信遅延が増大することが考えられる。その結果、ユーザに対するサーバ応答が遅延しユーザ間でオブジェクトの位置に差異が生じる事で VR サービスのインタラクティブ性が失われる可能性がある。一方で、MEC サーバを用いて VR 空間情報の管理を行った場合、ユーザは VR 空間情報を更新する際にクラウドサーバではなく、物理的に近い位置に存在する MEC サーバと通信を行えばよい。従ってユーザが利用する端末とサーバ間の通信の低遅延化が見込まれ、ユーザ間でのオブジェクト位置の差異が緩和され、VR サービスのインタラクティブ性が向上する。文献 [9] では実際にクラウドサーバで行う VR 映像のレンダリングの一部を MEC サーバを用いて行うことでユーザの視点移動に対する応答遅延を削減している。

しかし、すべての VR サービスの機能を MEC サーバに配置することは非現実的である。これは、MEC サーバの設置スペースに制約があることからクラウドサーバのような高性能化が見込めないことに起因する。従って、インタラクティブ性の向上に効果的な機能を MEC

サーバに配置し、インタラクティブ性の向上に必須ではない機能はクラウドサーバに配置するエッジ・クラウド連携を図る必要がある。

本報告では、ユーザ操作が VR 空間に作用し、その作用結果が他のユーザに伝達される VR 空間内オブジェクト情報の同期、レンダリング処理を伴う VR サービスを対象とする。しかし、ネットワークを介した VR サービスは研究開発が始まったばかりであり、VR サービスに必要なデータ通信量や情報処理量は明確化されていない段階にある。そこでユーザ同士の交流の情報処理を伴う VR サービスを実機に実装し、VR サービスのデータ通信量や MEC サーバによる通信遅延削減によるインタラクティブ性の変化を測定する。その上で、ユーザ間のインタラクティブ性がより向上する情報配置、情報処理箇所を明らかにし、インタラクティブ性を高める VR 空間の情報処理のエッジ・クラウド連携の指針を得ることを目指す。

2 エッジクラウド連携手法の提案

2.1 想定するサービス

本報告では、ユーザ操作が VR 空間に作用し、その作用結果が他のユーザに伝達される VR 空間の情報処理を伴う VR サービスとして複数のユーザが同一 VR 空間内に入室し、各ユーザのアバターや動きが反映されるような VR ショッピングサービスを想定する。サービスの内容として複数のユーザに対して実店舗を模した VR 空間を提供する。提供する VR 空間は以下の 2 種類となる。

- 複数の実店舗をまとめた仮想ショッピングモール VR 空間 (VR-M)
- 実店舗を模した VR 空間 (VR-S)

いずれの空間でも複数のユーザが同一の空間に入室することが可能で、ユーザはサービスを利用する場合はまず VR-M に訪れる。その後 VR-M 内に存在する複数の実店舗から訪れる店舗を 1 つ選択することでそれに対応する VR-S へ遷移する。VR-S 内でユーザは VR 空間内を自由に移動しながら VR 空間内に配置されている商品オブジェクトの操作、購入が行え、オブジェクトに対する操作が同じ VR-S に入室している他のユーザにも反映されるものとする。本報告で実装を行うサービスではユーザは VR 空間に対して以下の操作を行える。

- ユーザの位置移動 (キーボード入力)
- ユーザの視点移動 (キーボード入力)
- 商品オブジェクトの移動 (マウスドラッグ)
- 商品の購入 (マウス入力)

また VR-M、VR-S は実店舗の映像ではなく実店舗を元に構築された複数の 3D オブジェクトから構成される VR 空間で、実店舗の内装や商品などの 3D オブジェクトは作成済みとする。実際のサービス利用に関しては以下の様なものを想定している。サービスを利用する対象となるユーザは家族など物理的に近い範囲に存在するグループを想定する。各グループが同一 VR 空間に入室して互いに操作を行うものを考える。

2.2 構築する VR サービスシステム

2.2.1 VR 空間の構築方法

VR 空間は以下の情報と配置するオブジェクトデータを元に構築される。

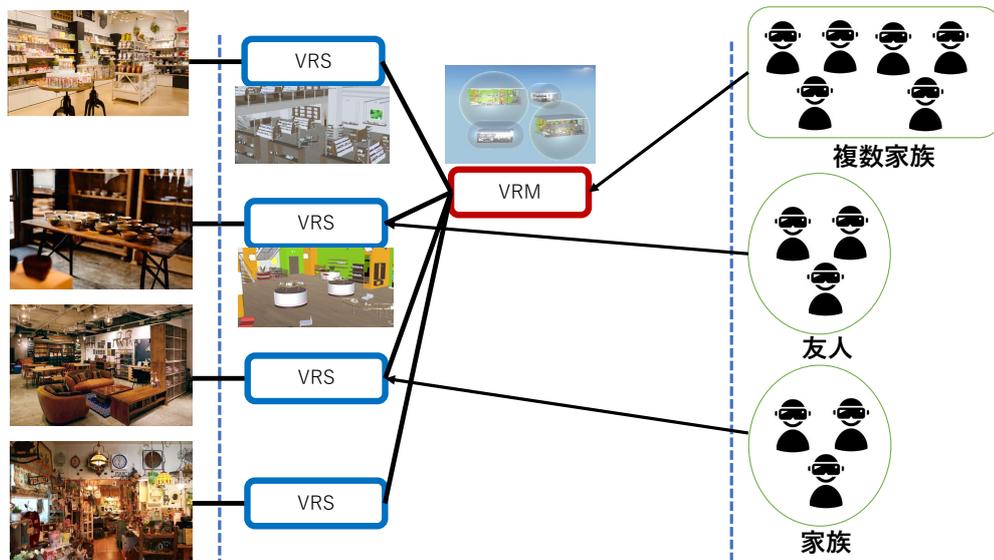


図 1: サービス利用図

- オブジェクトを識別する ID
- オブジェクトの 3 次元座標
- オブジェクトの角度

ここでオブジェクトとは VR 空間内でユーザが操作するアバターの 3D モデルや VR 空間内に存在する商品などの 3D モデルを指す。ユーザは訪れたい店舗の VR 空間を決定し VR 空間へ入室する際、まず入室する VR 空間の生成に必要なオブジェクトデータをサーバから受信し、その後に VR 空間情報を管理するサーバに接続してオブジェクトを識別する ID とそのオブジェクトの 3 次元座標、オブジェクトの角度を受信する。その後もユーザ間で VR 空間に存在するオブジェクトの座標の同期を行う必要があるため定期的に VR 空間情報を管理するサーバとの通信を行う。

2.2.2 MEC サーバとクラウドサーバの連携手法

本報告では VR 空間内に存在するアバターや商品オブジェクトの座標位置の同期、またアバターや商品オブジェクトをレンダリングするためのオブジェクトモデルデータの送受信の 2 点に注目して MEC とクラウドの連携手法を考える。

提案する MEC とクラウドの連携手法は図 2 に示す。VR 空間内オブジェクトの位置情報同期などの VR 空間管理はユーザ同士で通信が頻繁に発生し、ユーザ同士のインタラクティブ性に大きく関わるため MEC サーバで、VR 空間を生成するために必要となるオブジェク

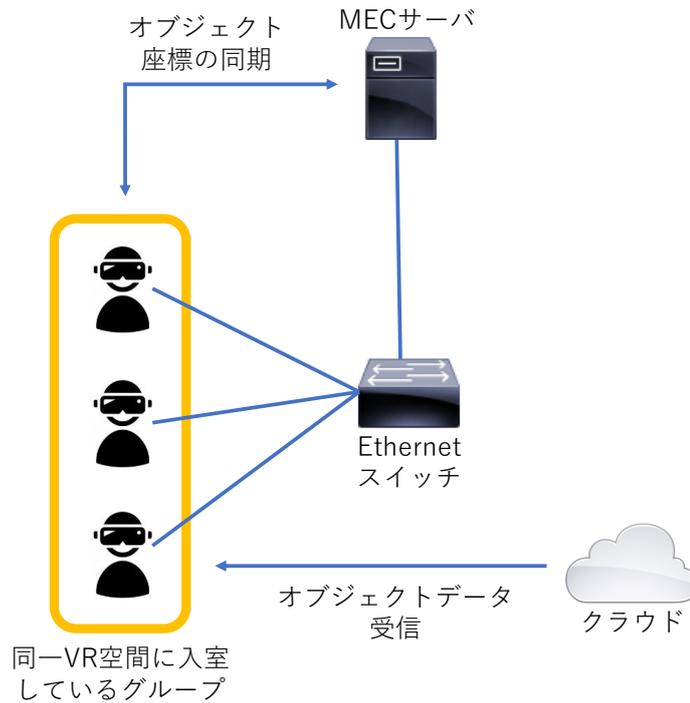


図 2: VR サービスシステム

トデータはクラウド上に配置する。そのためユーザはオブジェクトデータをダウンロードする際にクラウドからダウンロードを行う。ユーザが新しく VR 空間に入室する際の手順は図 3 に示す通りとなる。

1. VR 空間を構成する 3D モデルデータの要求 (クラウド)
2. 3D モデルデータの受信 (クラウド)
3. VR 空間管理サーバへ接続 (MEC サーバ)
4. 3D オブジェクトの位置情報を受信 (MEC サーバ)
5. ローカルに VR 空間を構築
6. オブジェクトの位置情報を更新 (MEC サーバ)

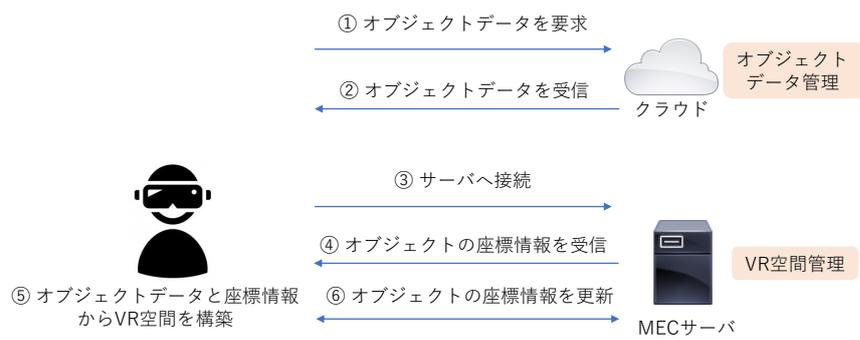


図 3: VR サービスへのアクセス手順



図 4: VR 空間管理サーバ

3 MEC を利用した VR サービスの実装

3.1 VR 空間管理

3.1.1 VR 空間情報の管理

文献 [10] と同様の方法でサーバの実装を行う。photon-server-sdk_v4 を用いて PUN2 (Photon Unity Networking 2) の機能を使用してユーザ同士が通信できるサーバを構築する。PUN2 とはマルチプレイヤーアプリケーション対応の Unity パッケージでありマッチメイキング機能によってユーザがルームと呼ばれる空間に入室し、ユーザが入室した各ルーム内でオブジェクト情報のユーザ間での同期、ルーム内の他のユーザに対して任意の処理の呼び出しが可能となる。ここでのルームとはサーバが所有する情報の管理単位を示しておりそれぞれのルームが1つの VR 空間に相当する。ユーザはサーバに接続した後に選択したルームに入室することで VR 空間情報をサーバから受け取って VR 空間の生成を行う。VR 空間管理を行うサーバは主に以下のようなデータを管理する。

- オブジェクトに対する固有の ID
- オブジェクトの座標情報
- サーバに接続中のユーザ

VR 空間に入室するユーザは入室時にオブジェクトに割り当てられた固有の ID とそれに対応する座標情報をサーバから受け取ってユーザ自身がローカルでレンダリングを行う。VR 空間にユーザが入室した際にサーバはユーザのデータを対応するルームに追加する。

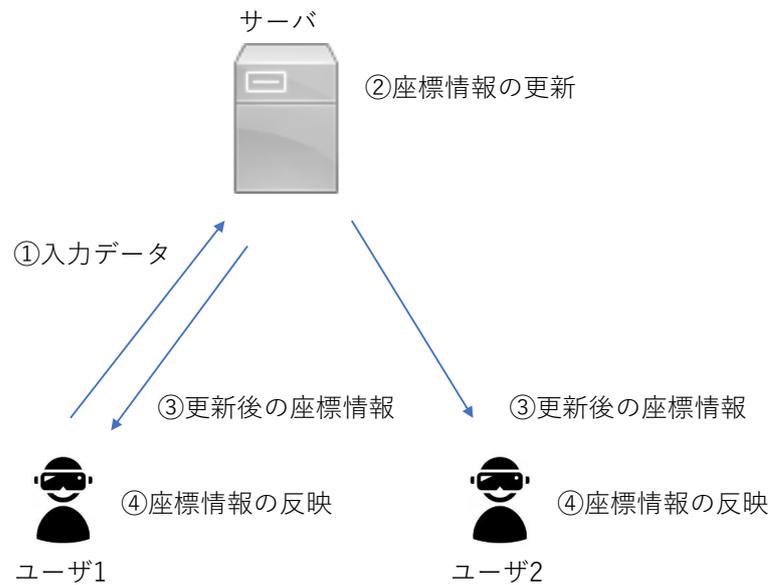


図 5: 座標情報の同期 (ユーザ 1 が入力を与えた場合)

3.1.2 座標情報の同期

アバターやオブジェクトの移動はサーバがユーザからのキーボード、マウスによる入力を受け取り、それに応じた処理を実行した後に実行した結果として得られた更新後のアバターやオブジェクトの座標情報を同一 VR 空間へ入室しているユーザへと送信し、ユーザがそれを反映させる方法で行う。毎フレームごとにユーザによるキーボード、マウスからの入力を受け取り 1 秒に 30 回の頻度でサーバに対して送信を行う。サーバで入力に対する処理を行い、それによって更新された座標情報を 1 秒に 30 回の頻度で接続中の全ユーザに対して送信する。これによってユーザ間での座標情報の同期を行う。

1. キーボード、マウスによる入力をサーバに対して送信 (ユーザ)
2. 入力を元に座標情報を更新 (サーバ)
3. 更新後の座標情報をユーザに対して送信 (サーバ)
4. 受信した座標情報を反映 (ユーザ)

以上の処理に要する時間を座標情報反映遅延とする。

3.2 オブジェクトモデルの管理

Apache 2.4.52 をインストールし http 通信によるデータの送受信が可能なサーバを構築する。オブジェクトのモデルはアプリケーションの実行中に読み込む必要があるため文献 [11] と同様に AssetBundleData と呼ばれるデータ形式を採用する。AssetBundleData とは Unity 上で事前にコンパイルされたオブジェクト情報を含んだバイナリファイルの事であり、事前にコンパイルされているためアプリケーションの動作中に読み込んで対応するオブジェクトを生成することが可能となる。

ユーザはルームへの入室時、また VR 空間内に新しくオブジェクトが追加される場合など 3D オブジェクトを構築する必要が発生した際に http 通信によって構築する 3D オブジェクトデータを含む AssetBundleData のダウンロードを行う。

3.3 実装サービスの動作例

実際にサービスを使用して VR-S に入室した際のユーザ視点は図 6、またユーザ同士が交流を行っている場面を図 7 に示す。この他にヘッドマウントディスプレイやコントローラーを用いた時に想定される顔の向きや腕の動きだけでなく、アバターの移動中や静止中に自然にオブジェクトの体部分を動かすアニメーションを追加することによってより現実同様に他者と交流している感覚を体感できるように実装を行っている。

VR を用いてショッピングを行う利点として、実店舗と比較して空間の制約がなく店舗内のレイアウトに関してもオブジェクトの配置場所を簡単に変更することができることに加えてオブジェクトの種類と座標情報を記録しておくことで店舗内のレイアウトを複数用意し、すぐに切り替えることができるため実空間と比較して内装の決定、変更が自在で簡単に行える。そのためユーザ交流のコンテキストに応じて即座に店舗レイアウトを入れ替えることも実現可能である。また、Web ページを用いたインターネットショッピングと比較すると、VR サービスを利用することで店舗内の雰囲気を含めて商品の閲覧が行えることや、空間内に他者が存在することでショッピングに際してインターネットショッピングのように無機質なものではなく他者と交流を楽しみながら行えることが体感できる。ただし、実際に VR サービスを作成してみると、店舗内での VR オブジェクトの陳列に時間を要することもわかった。この点は、実店舗の商品陳列情報をセンシングして反映していく方策が必要であると考えられる。



図 6: アプリケーションの動作例 (ユーザ視点)



図 7: アプリケーションの動作例 (他ユーザと商品を選んでいる様子)

4 VRサービスにおけるエッジクラウド連携手法の評価

4.1 インタラクティブ性

本報告ではインタラクティブ性を座標情報反映遅延の大きさとオブジェクトのダウンロード時間の2つの観点から評価する。座標情報反映遅延はユーザがアバターの移動操作などの入力を行ってから入力がサーバによって処理され実際にVR空間内のすべてのユーザに対して入力の結果が反映されるまでに要する時間を指す。この遅延が大きくなると任意のユーザの動作に応じて同じVR空間内に存在する他のユーザが反応を示す、または行動を行う際にユーザに対する反応が反映されるまでの時間が増えることでユーザ間のインタラクティブ性が損なわれる。

また、オブジェクトのダウンロード時間はユーザが新たにVR空間に入室または移動する際の待機時間に含まれるためアプリケーション自体のインタラクティブ性に関わる。さらに、任意のユーザが所持するオブジェクトをルームに対して新しく挿入する場合に他のユーザはそのオブジェクトデータをダウンロードする必要があるためオブジェクトのダウンロード時間がユーザ同士のインタラクティブ性に影響することも考えられる。

4.2 実験環境

図8のネットワークを構築し遅延用サーバを用いてアプリケーションが実際に利用される一般的な家庭などからMEC、またはクラウドサーバにアクセスした際の通信遅延を再現して実験を行う。具体的には遅延用サーバを通るパケットを遅延用サーバ内で待機させることで再現を行う。遅延用サーバでパケットを待機させる時間は以下の4つのパラメータ値によって決定される。

T_{up_base}	ユーザPCがアプリケーションサーバへデータを送信する際の遅延の基準値
up_jitter	ユーザPCがアプリケーションサーバへデータを送信する際の遅延の振れ幅
T_{down_base}	ユーザPCがアプリケーションサーバからデータを受信する際の遅延の基準値
down_jitter	ユーザPCがアプリケーションサーバからデータを受信する際の遅延の振れ幅

ユーザPCからアプリケーションサーバへデータを送信する際に遅延用サーバ内でパケットを待機させる時間を T_{up} は式(1)、ユーザPCがアプリケーションサーバからデータを受信する際の遅延用サーバ内でパケットを待機させる時間を T_{down} は式(2)で定義される。

$$T_{up} = T_{up_base} + T_{up_jitter} \quad (1)$$

$$T_{down} = T_{down_base} + T_{down_jitter} \quad (2)$$

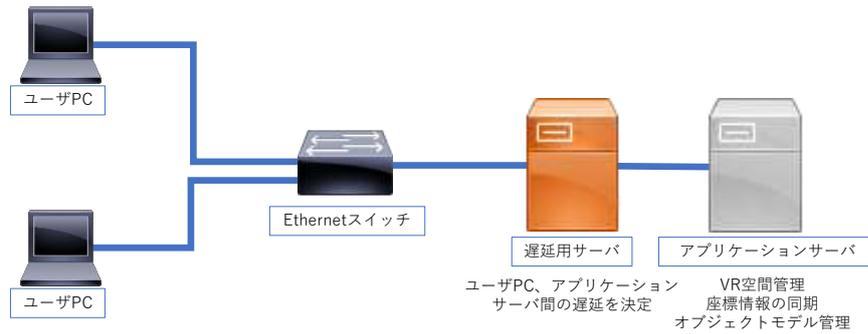


図 8: ネットワーク構成

表 1: 遅延シナリオ

シナリオ	T_{up_base} [ms]	T_{up_jitter} [ms]	T_{down_base} [ms]	T_{down_jitter} [ms]
5G-MEC	15	30	15	30
5G-Cloud[slow]	50	100	50	100
5G-Cloud[fast]	30	60	30	60
B5G-MEC	1	0	1	0

ただし T_{up_jitter} は 0 から up_jitter の範囲で一様分布に従う値であり、 T_{down_jitter} は 0 から down_jitter の範囲で一様分布に従う値である。

4.3 評価方法

4種類の遅延シナリオで座標情報の同期、オブジェクトのダウンロードに関して評価を行う。想定環境と遅延用サーバで設定する値の対応は表1に示す。5G-MECは実際に5G環境で測定した値を元に決定し、5G-Cloudでは物理的に離れた場所に存在するため遅延の基準値を増加させる。5G-Cloud[slow]はユーザの居住地がクラウドサーバから離れた場所であることを想定して5G-Cloud[fast]に対して遅延を追加した値を基準値に設定する。ユーザからの距離が離れるほど、また回線が混雑するほど回線混雑時の遅延の振れ幅が大きいと考えて基準値に追加で jitter を設定する。また B5G-MEC は MEC まで通信に URLLC (ultra-reliable and low latency communications) 技術 [12] が採用されることを想定した値を設定している。

4.3.1 座標情報の同期

表1に示した4種類のシナリオの値を遅延用サーバに設定して評価を行う。座標情報の同期に関して2種類の客観的な評価を行う。まず1つ目の評価に関しては座標情報反映遅延の

表 2: オブジェクトデータサイズ

オブジェクト	データの大きさ (MByte)
VR-S	65.341
高ポリゴンオブジェクト (図 10 左)	2.491
低ポリゴンオブジェクト (図 10 右)	1.641

測定を行う。図 8 のネットワークで 2 人のユーザがアプリケーションサーバに接続したのちに同一ルームに入室する。その中で 1 人のユーザがアバターを移動させる入力を行い、その時の座標情報反映遅延を測定する。移動の入力は連続して行い、座標情報反映遅延を 100 回測定する。その結果から座標情報反映遅延の平均値、最大値、最小値を測定する。

もう 1 つの評価では座標情報反映遅延によってどの程度オブジェクトの座標に差が生じるかを評価する。ここでは主に VR ショッピングにおいてユーザ間での商品の受け渡しなどの際に発生する連続的な挙動を行う際にネットワーク上での遅延によって人間の予測に基づいた動きとどの程度のずれが生じ違和感を覚えるかということを模式的に評価することを目的とする。図 8 のネットワークで 2 人のユーザがアプリケーションサーバに接続したのちに同一ルームに入室する。ここで 1 人のユーザがオブジェクトを移動させる入力を行いもう 1 人のユーザに反映させる。オブジェクトの座標の差を確認しやすくするためにアプリケーションをサーバを通して他のユーザの入力を反映するオブジェクトの他に同じ入力を与えてローカルで処理を行った場合のオブジェクトを配置して差を確認する。ここでローカルで処理を行ったオブジェクトが人間の予測に基づいた動きを行う場合に対応する。

ユーザが与える入力を揃える必要があるため図 9 のように 2 つの球体と平面を生成して球体に重力を与え、平面での跳ね返りの様子を確認する。ここで球体の 1 つの座標はローカルで重力を与え座標位置の計算を行った結果を反映したもの (図 9 右) で、もう 1 つが他のユーザが球体に重力を与えて座標位置の計算を行った結果をアプリケーションサーバを通して受け取った結果を反映したオブジェクト (図 9 左) である。これを各シナリオで行い座標の差を確認する。

4.3.2 オブジェクトのダウンロード

表 1 に示した 4 種類のシナリオの値を遅延用サーバに設定して評価を行う。具体的には表 2 に示す 3 種類のオブジェクトデータのダウンロードを行い、ダウンロードに要する時間を計測する。

VR-S は 150 種類程度のオブジェクトを含んだ 1 店舗全体のオブジェクトを指し、このデータをルーム入室前にダウンロードするため VR-S のオブジェクトダウンロード時間がユーザ

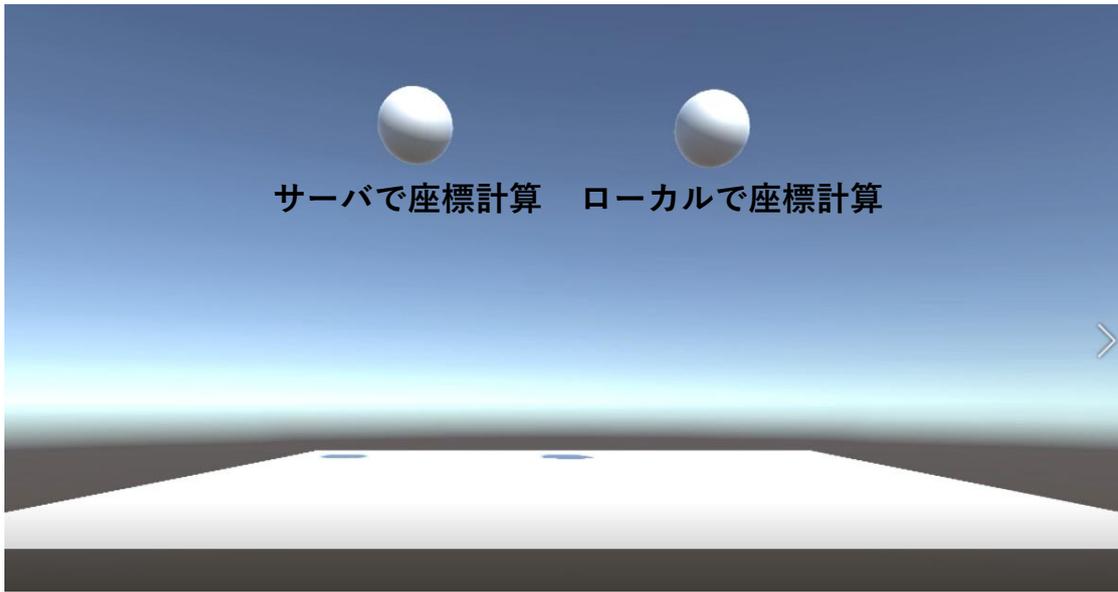


図 9: オブジェクトの座標誤差の評価



図 10: データオブジェクト

がルームに入室する際の待機時間であるためこの結果がユーザがルームに入室する際のアプリケーションのインタラクティブ性に関わる。高ポリゴンオブジェクト、低ポリゴンオブジェクトはそれぞれ1つのオブジェクトでこれらのダウンロードに要する時間の結果がユーザが新規オブジェクトを挿入する際のユーザ間のインタラクティブ性に関わる。

表 3: 座標情報反映遅延

シナリオ	平均値 (ms)	最小値 (ms)	最大値 (ms)
5G-MEC	125	82	183
5G-Cloud[slow]	299	240	368
5G-Cloud[fast]	198	138	264
B5G-MEC	60	27	118

4.4 評価結果

4.4.1 座標情報の同期

座標情報反映遅延を連続して 100 回計測した結果を表に示す。結果から 5G-MEC を用いた場合には Cloud[slow] と比較して座標情報反映遅延が約 175ms、Cloud[fast] よりも約 70ms 短縮されることが分かった。これは今回実装したアプリケーションの平均的なフレームレートが 30fps 程度のため Cloud[slow] では約 5 フレーム分、クラウドの高速時では約 2 フレーム分の遅延が短縮される。

5G-MEC シナリオおよび B5G-MEC シナリオでは Cloud[slow]、Cloud[fast] と比較して座標のずれが小さくなっていることが確認できた。また、クラウドの方が座標情報反映遅延の最小値、最大値の幅が大きいことからフレームのずれにより球体の動きが不規則に見える瞬間や、球体が平面と衝突せずに跳ね返るといった動きをする場面が多く現れた。このような不規則性は、利用者が予測する球体運動とは乖離することから、VR サービス利用時の疲労感に直結するものと考えられるが、定量的な評価は今後の課題である。

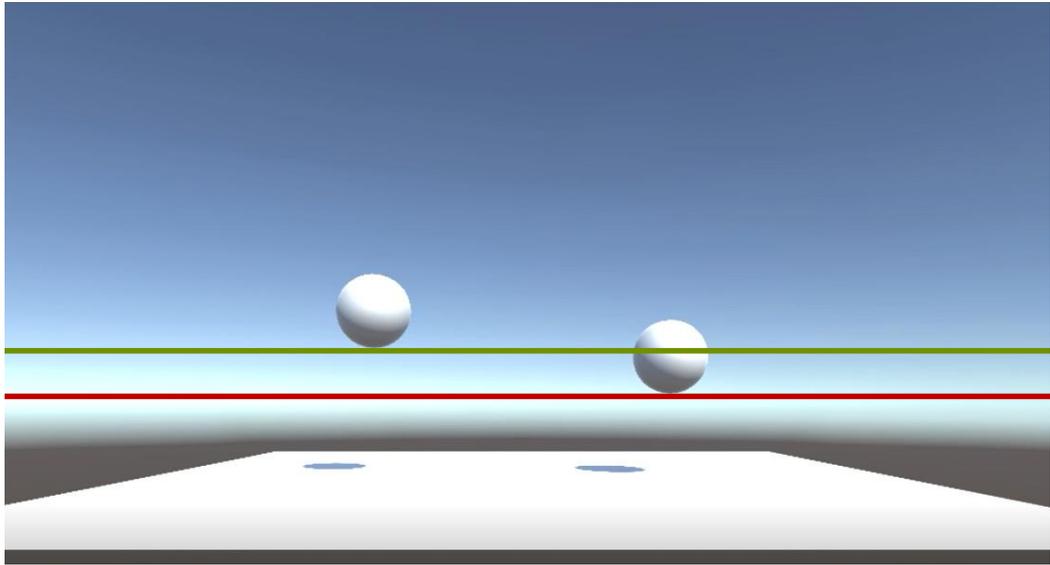


図 11: オブジェクトの座標誤差 (5G-MEC シナリオ)

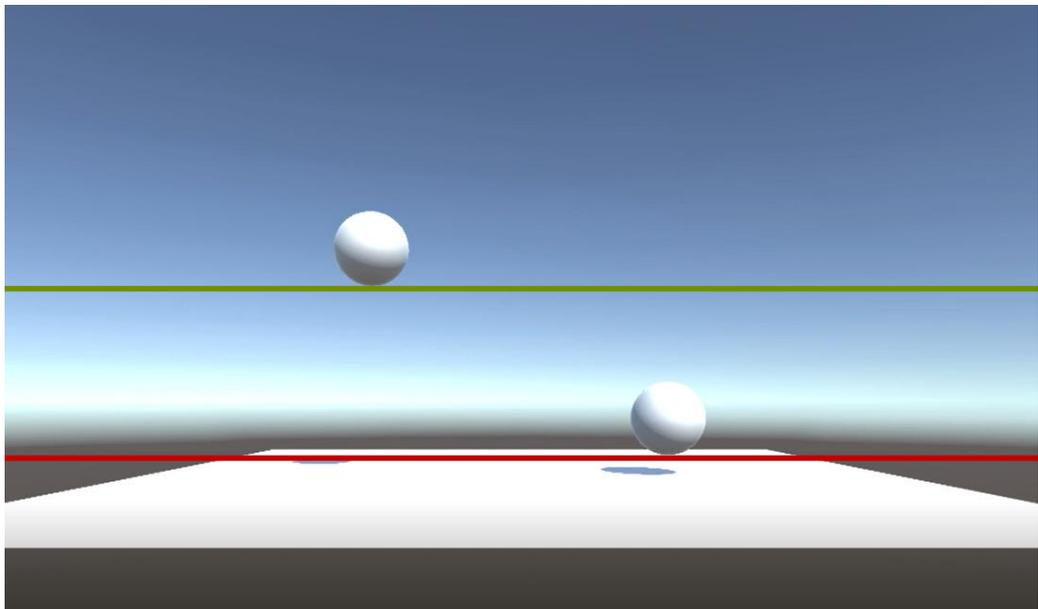


図 12: オブジェクトの座標誤差 (5G-Cloud[slow] シナリオ)

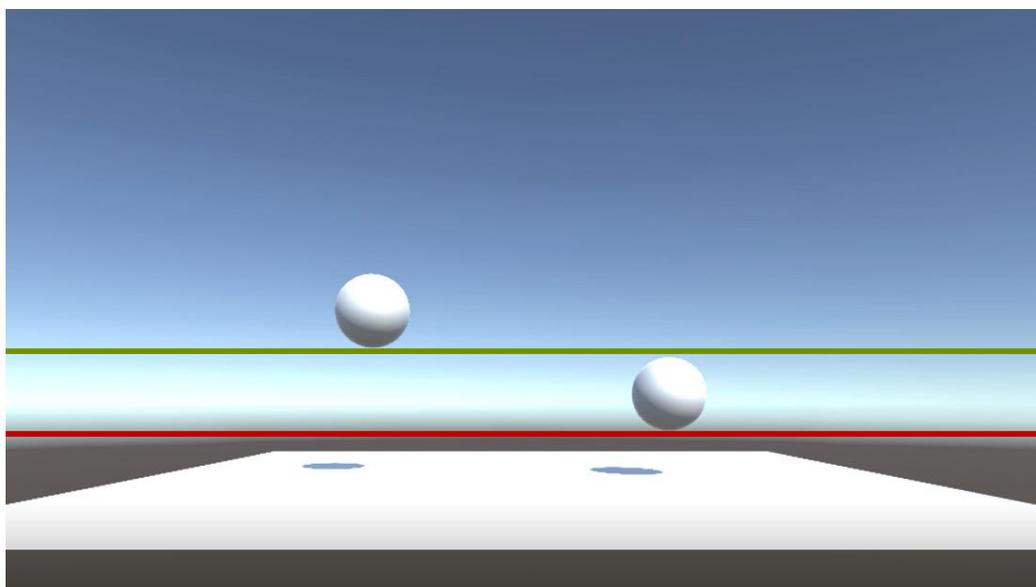


図 13: オブジェクトの座標誤差 (5G-Cloud[fast] シナリオ)

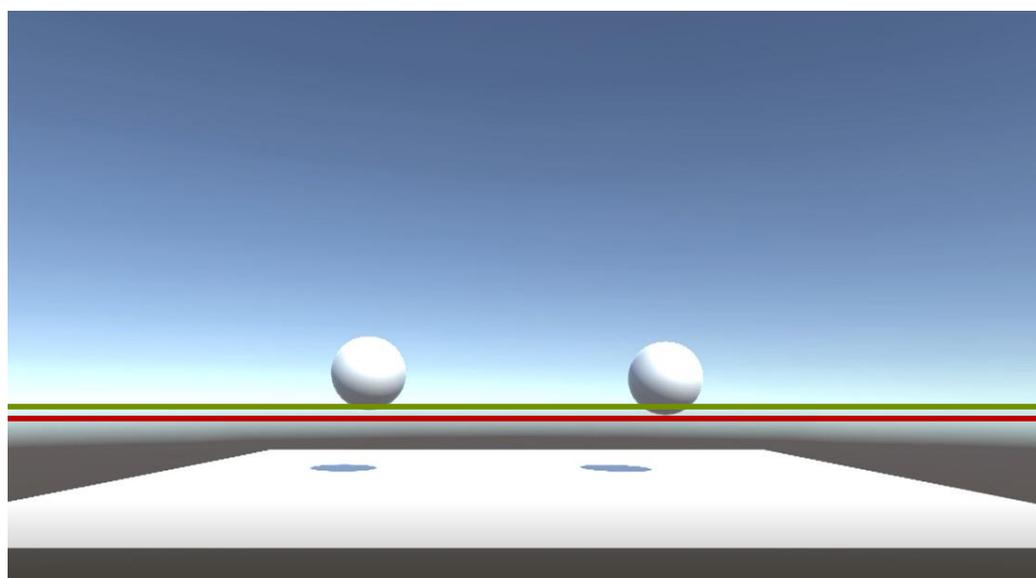


図 14: オブジェクトの座標誤差 (B5G-MEC シナリオ)

表 4: VR オブジェクトのダウンロード時間

シナリオ	低ポリゴンデータ (s)	高ポリゴンデータ (s)	1 店舗データ (s)
5G-MEC	0.944	1.202	7.566
5G-Cloud[slow]	2.696	3.326	19.446
5G-Cloud[fast]	1.655	2.439	10.399
B5G-MEC	0.221	0.324	6.546

4.4.2 オブジェクトのダウンロード

実際に各想定環境においてダウンロードを行った結果を表 4 に示す。結果はそれぞれ 3 回ずつ計測を行い、その平均値を取った値を記述する。結果から 5GMEC ではオブジェクト 1 つをダウンロードする時間は約 1 秒程度で低ポリゴンデータと高ポリゴンデータのどちらをダウンロードするかでは約 0.2 秒の違いがあることが分かった。また Cloud[slow] と比較するとすべて半分以下の時間でダウンロードが行える事が分かった。

4.5 エッジクラウド連携手法

座標情報反映遅延の計測結果から MEC を用いた場合、Cloud[slow] と比較して約 175ms 高速化されている事が分かった。これは VR に使用するヘッドマウントディスプレイの性能が向上し、フレームレートが高くなるにつれて違いが明確に表れると考えられる。これはフレームレートが高くなると同じ遅延時間でもその間にユーザの視点映像が変化する回数が多くなるためより遅延を感じやすくなることが予想されるからである。現在広く普及しているスタンドアロン型の VR ヘッドマウントディスプレイである OculusQuest2 ではフレームレートとして最大 120Hz を選択することができる。この 120Hz では 175ms は 21 フレーム分の遅延となる。また、文献 [13] によると現実世界を再現するようなアプリケーションを提供するには 1800Hz よりも大きいフレームレートが必要であることを考えると 175ms は約 300 フレーム分となり、大きな差になることが予想される。

また、MEC では Cloud と比較して座標情報反映遅延の最小値と最大値の幅が大きくなっている。遅延の幅が大きくなると任意のフレームでのユーザ入力に対する更新後の座標を受信するよりもそれ以降のフレームでのユーザ入力に対する更新後の座標を先に受信する可能性が高くなるため連続的な挙動を行うオブジェクト座標が滑らかではなくなり、入力に対する更新座標の時系列が入れ替わることによってオブジェクトが入力に対応しない動き方をする可能性が生まれる。

以上の点から座標情報の更新は MEC に配置する方が優れていると考えられる。

ダウンロード時間に関しては現在のシステムではユーザが VR 空間へ入室する際にまず VR 空間内のオブジェクトデータを全てダウンロードしてからレンダリングを行う方法を採っているため表 4 に示す 1 店舗データのダウンロードにかかる時間だけユーザは入室を待機する必要がある。この結果から 1 店舗オブジェクトデータを MEC に配置することでユーザの入室時間がクラウドの低速時と比較して 12 秒程度短縮されるため MEC を用いることでユーザがより快適に別の VR 空間へと移動できるようになる。しかし、5G-MEC を用いた場合でも数秒の遅延が発生していることや、クラウドと比較して MEC サーバの容量に制限があることを考慮すると 5G 環境で MEC にオブジェクトデータを配置する利点は少ないと考えられる。

また 1 つのオブジェクトデータをサーバから受信する際の受信時間は低ポリゴンデータ、高ポリゴンデータ共に MEC と Cloud[slow] と比較しても 2 秒程度の差があるため高ポリゴンデータはクラウド上に配置し低ポリゴンデータは MEC にキャッシュしておくことでユーザが新しくオブジェクトをダウンロードする際にまず MEC から低ポリゴンデータを受信し、その後にクラウドから高ポリゴンデータを受信したタイミングでオブジェクトを差し替えるなど MEC とクラウドで情報を分散して管理することでユーザの新規オブジェクトの挿入に対するアプリケーションのインタラクティブ性の向上が期待できる。さらに今回のシナリオではアプリケーションを利用することを想定しているユーザが友達や家族などであるため同一の VR 空間に同じタイミングで入室することが多いと想定される。この場合対応する VR 空間内オブジェクトデータの時間的な参照局所性が高くなるため一度ダウンロードされたオブジェクトデータをクラウドから MEC にキャッシュしておくこともまた有効であると考えられる。

それに加えて VR 空間内に入室した後に自分が所有しているオブジェクトを挿入するなど新規オブジェクトの送受信が行われる場合はオブジェクトデータをクラウドに配置する必要はなく MEC を通して送受信すればよいため MEC を用いて通信を行うことで Cloud[slow] と比較して 2 秒程度の遅延の削減が行われ、ユーザ同士のインタラクティブ性の向上が実現できる。

以上の点からオブジェクトデータは基本的にクラウドに配置し、直近でユーザによってダウンロードされたオブジェクトデータや低ポリゴンのオブジェクトデータは MEC にキャッシュすることを考える。また B5G-MEC では低ポリゴンオブジェクト、高ポリゴンオブジェクト共に 1 つのオブジェクトであれば 300ms 程度と大幅なダウンロード時間の短縮が実現できるため B5G 環境ではオブジェクトデータを MEC に配置することがより有効であると考えられる。

最後に、上記の知見を反映することで実現される VR サービスのイメージ図を図 15 に示す。なお図 15 のスクリーンショットはエッジクラウド連携を行ったものではなく、サーバ

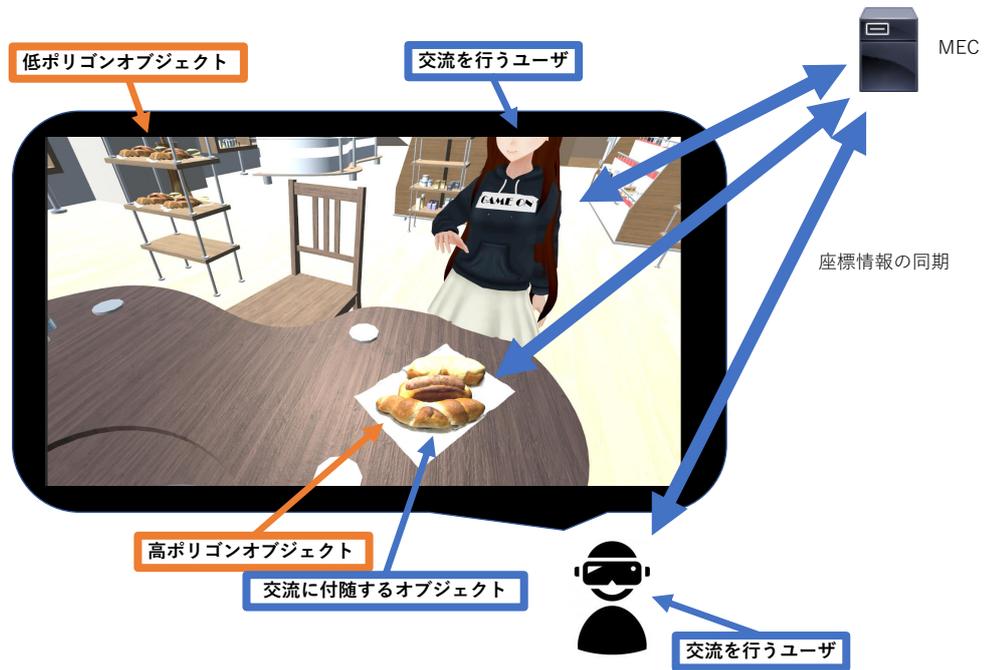


図 15: 低ポリゴン、高ポリゴンオブジェクトを統合した VR 空間例

単体で動作している VR サービスのものである。図 15 では、交流を行うユーザーと交流に付随する VR オブジェクト（パン）の位置座標をエッジサーバで行う。さらに VR 空間内で高ポリゴンオブジェクトを用いる場所と低ポリゴンオブジェクトを用いる場所を分けることを考える。MEC に低ポリゴンオブジェクトを配置することによりユーザーの入室直後は低ポリゴンオブジェクトのみで素早く VR 空間の生成を行い、ユーザーが操作する対象となったオブジェクトなどインタラクションに関わる位置に存在するオブジェクトの高ポリゴンデータをその都度クラウドからダウンロードする。これによってユーザーの入室をできる限り少ない時間で行い、かつユーザーの見る空間オブジェクトの質を向上させることが可能となる。

5 おわりに

本報告では座標情報の同期とオブジェクトのダウンロードに注目して MEC とクラウドの連携手法について提案、評価を行った。結果として座標情報の同期を MEC で行った場合にクラウドで行った場合に比べて約 175ms の短縮となり、主観的にアプリケーションを利用しても違いが分かる程度の短縮時間であった。またオブジェクトのダウンロード時間に関しては 1 店舗オブジェクトのダウンロードに要する時間が MEC を用いることで約 12 秒短縮されたが MEC に配置できる情報量を考慮して基本的にはクラウドに配置しユーザによる新規オブジェクトの挿入などに関して一時的にオブジェクトを MEC に配置する方法が優れていると考えられる。

本報告ではオブジェクトの座標情報、オブジェクトのダウンロードのみに注目して測定、評価を行ったが実際に VR アプリケーションを利用する際には他にも様々な情報処理が必要となるため、この他にも例えばユーザの見ている範囲のオブジェクトに関する情報処理を MEC で行い、それ以外のオブジェクトに関する情報処理をクラウドで行うなどエッジクラウド連携を用いることでインタラクティブ性が向上する例は多いと予想される。

謝辞

本報告を終えるにあたり、終始熱心にご指導頂きました大阪大学大学院情報科学研究科村田正幸教授に深謝いたします。大阪大学大学院情報科学研究科荒川伸一准教授には本報告を進めるにあたり、本報告の内容や方向性に関して親身にご指導頂きました。心より感謝いたします。また、平素よりご指導いただきました大阪大学先導的学際研究機構大下裕一准教授、大阪大学情報科学研究科小南大智助教、大阪大学経済学研究科経営学系専攻大歳達也助教に深く感謝いたします。最後に日頃より様々な面で支えて頂きました村田研究室の皆様に感謝いたします。

参考文献

- [1] F. Pallavicini, I. A. C. Giglioli, G. J. Kim, M. Alcaniz, and A. Rizzo, “Editorial: Virtual Reality, Augmented Reality and Video Games for Addressing the Impact of COVID-19 on Mental Health,” *Frontiers in Virtual Reality*, vol. 2, p. 91, Jul. 2021.
- [2] “Sync,” <https://sync.vive.com/>, accessed: 2021-2-7.
- [3] “VARK,” <https://vark.co.jp/>, accessed: 2021-2-7.
- [4] “wave,” <https://wavexr.com/>, accessed: 2021-12-8.
- [5] W.-C. Hsu, P.-H. Chen, and C.-Y. Chen, “An Exploration of the Impact of Virtual Reality Interfaces on Online Shopping,” *Information Resources Management Journal*, vol. 33, no. 2, pp. 19–39, Nov. 2021.
- [6] B. Shen, W. Tan, J. Guo, L. Zhao, and P. Qin, “How to Promote User Purchase in Metaverse? A Systematic Literature Review on Consumer Behavior Research and Virtual Commerce Application Design,” *Applied Sciences*, vol. 11, no. 23, p. 11087, 2021.
- [7] W.-C. Hsu, P.-H. Chen, and C.-Y. Chen, “An Exploration of the Impact of Virtual Reality Interfaces on Online Shopping,” *Information Resources Management Journal*, vol. 33, no. 2, pp. 1–21, 2020.
- [8] S. Kekki, W. Featherstone, Y. Fang, P. Kuure, A. Li, A. Ranjan, D. Purkayastha, F. Jiangping, D. Frydman, G. Verin *et al.*, “MEC in 5G networks,” *ETSI white paper*, vol. 28, no. 2018, pp. 1–28, Jun. 2018.
- [9] S. Shi, V. Gupta, M. Hwang, and R. Jana, “Mobile VR on edge cloud: a latency-driven design,” in *Proceedings of the 10th ACM Multimedia Systems Conference*, Jun. 2019, pp. 222–231.
- [10] S. Wang and T. Ogi, “A Shared Virtual Reality Tourism System with Emotional Connections,” *Proceedings of the Virtual Reality Society of Japan, Annual Conference*, pp. 1–4, Sep. 2021.

- [11] C. Gamage, V. Pinto, C. Xue, M. Stephenson, P. Zhang, and J. Renz, “Novelty Generation Framework for AI Agents in Angry Birds Style Physics Games,” in *Proceedings of 2021 IEEE Conference on Games (CoG)*, Aug. 2021, pp. 1–8.
- [12] J. Park, S. Samarakoon, H. Shiri, M. K. Abdel-Aziz, T. Nishio, A. Elgabli, and M. Bennis, “Extreme URLLC: Vision, challenges, and key enablers,” *arXiv preprint arXiv:2001.09683*, Jan. 2020.
- [13] E. Cuervo, K. Chintalapudi, and M. Kotaru, “Creating the perfect illusion: What will it take to create life-like virtual reality headsets?” in *Proceedings of the 19th International Workshop on Mobile Computing Systems & Applications*, Feb. 2018, pp. 7–12.