

# 特別研究報告

題目

エッジコンピューティングを用いた複合現実型サービスにおける  
ユーザーの体感品質の向上性に関する評価

指導教員

村田 正幸 教授

報告者

高木 詩織

平成 30 年 2 月 14 日

大阪大学 基礎工学部 情報科学科

[1]

## 参考文献

- [1] 高木 詩織, “エッジコンピューティングを用いた複合現実型サービスにおけるユーザーの体感品質の向上性に関する評価,” February 2018.

エッジコンピューティングを用いた複合現実型サービスにおけるユーザーの体感品質の向上性に関する評価

高木 詩織

## 内容梗概

近年、インターネットを通して提供されるサービスは人々の要求に応じて多様化しており、数多くの新しいアプリケーションやサービスが登場している。また、近年、ネットワークの研究分野では、エッジコンピューティングの研究開発が進められている。エッジコンピューティングでは、通信網のエッジである基地局などにコンピューティングリソースやストレージを配備することで、末端端末が必要とする処理をより末端端末に近い場所で行う。これにより、遅延を抑え、アプリケーションの応答性が改善されることが期待されている。また、最近では、仮想現実 (VR: Virtual Reality) 技術や 複合現実 (MR: Mixed Reality) 技術が発展し、これらの技術を用いて臨場感のある体験を提供するネットワークサービスが展開されつつある。仮想現実技術や複合現実技術を用いたネットワークサービスの登場に際し、情報ネットワークにおいても新たなプロトコルの導入・開発が求められる可能性はある。しかし、新たなプロトコルを導入するにあたっては、ユーザーの体感品質が何によって決定づけられるのかを明らかにする必要がある。仮想現実技術や複合現実技術を用いたネットワークサービスでは、ユーザーが一方向的に音声や映像などの体験を享受するサービスと比べて、ネットワークの遅延やパケットロスの増大に対するユーザー体感品質の変化が大きくなる可能性がある。

そこで、本報告では、仮想現実技術／複合現実技術とエッジコンピューティングを組み合わせたアプリケーションとして、局所的に取得される実世界の情報を局所的に統合・処理を行いつつ遠隔地のロボットへ情報伝達を行い、ユーザーに対して新たな臨場体験を提供するアプリケーションを考案し、エッジコンピューティングの導入によるユーザーの体感品質の向上性を検証する。検証の結果、遅延が 720 [ms] から 920 [ms] の間でユーザーの体感品質が急激に悪化するため、クラウドコンピューティング環境で約 1 秒の遅延が発生するサービス環境では、エッジコンピューティングの導入によりユーザーの体感品質が向上する見込みがあることが明らかとなった。

## 主な用語

複合現実 (MR: Mixed Reality)、エッジコンピューティング、サービス品質 (Quality of Service)、ユーザー体感品質 (QoE: Quality of Experience)、ネットワークロボット

## 目次

<b>1</b>	<b>はじめに</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>関連研究</b>	<b>8</b>
2.1	複合現実技術 (MR) . . . . .	8
2.2	ユーザー体感品質 (QoE) . . . . .	10
<b>3</b>	<b>ネットワークを利用した複合現実型サービス</b>	<b>12</b>
3.1	想定するサービス . . . . .	12
3.2	実装したアプリケーションプログラム . . . . .	14
3.3	アプリケーションの実行例 . . . . .	18
<b>4</b>	<b>複合現実型サービスにおけるユーザーの体感品質の評価</b>	<b>18</b>
4.1	実験環境 . . . . .	19
4.2	評価方法 . . . . .	22
4.3	実験結果 . . . . .	23
<b>5</b>	<b>おわりに</b>	<b>28</b>
	謝辞	29
	参考文献	30



## 目 次

1	ネットワークを利用した複合現実技術の例 . . . . .	8
2	クラウドコンピューティングとエッジコンピューティング . . . . .	9
3	エッジコンピューティングを用いた AR コンテンツの配信 . . . . .	10
4	サービスイメージ図: クラウドコンピューティング . . . . .	12
5	サービスイメージ図: エッジコンピューティング . . . . .	13
6	想定するロボット側の処理 . . . . .	14
7	想定するユーザー側の処理 . . . . .	15
8	本報告におけるユーザー側のアプリケーションでの処理 . . . . .	16
9	ユーザーの視界イメージ . . . . .	16
10	本報告におけるロボット側の処理 . . . . .	18
11	ロボット側の映像処理の流れ . . . . .	19
12	アプリケーションの実行例: 情報更新前 . . . . .	19
13	アプリケーションの実行例: 情報更新後 . . . . .	20
14	実験用ネットワーク構成 . . . . .	21
15	予備実験の結果 . . . . .	24
16	タスク 1 のネットワーク遅延とタスク完了時間 . . . . .	24
17	タスク 2 のネットワーク遅延とタスク完了時間 . . . . .	25
18	タスク 3 のネットワーク遅延とタスク完了時間 . . . . .	25
19	タスク 4 のネットワーク遅延とタスク完了時間 . . . . .	26
20	ユーザーの主観評価 . . . . .	26

## 表 目 次

1	ACR 評価カテゴリ . . . . .	11
2	CCR 評価カテゴリ . . . . .	11
3	指ジェスチャーとロボットの方向の対応 . . . . .	15
4	仮想マシンの諸元 . . . . .	20
5	ロボットの諸元 . . . . .	20
6	映像の諸元 . . . . .	21
7	ユーザーに与えるタスクと参照する環境情報 . . . . .	22
8	評価カテゴリ . . . . .	23

## 1 はじめに

スマートフォンやタブレット端末が普及するとともに、インターネットはますます人々に身近な存在となっている。インターネットを通して提供されるサービスは人々の要求に応じて多様化しており、数多くの新しいアプリケーションやサービスが登場している。

近年、ネットワークの研究分野では、エッジコンピューティングの研究開発が進められている。エッジコンピューティングでは、通信網のエッジである基地局などにコンピューティングリソースやストレージを配備することで、末端端末が必要とする処理をより末端端末に近い場所で行う。これにより、遅延を抑え、アプリケーションの応答性が改善されることが期待されている [1]。例えば、カメラやセンサーなどを搭載した端末において取得された実世界の情報を、別拠点のデータセンターへ転送することなく、局所的に統合・処理を行うことが期待される。エッジコンピューティングにおいてモビリティをサポートするのがモバイルエッジコンピューティング (MEC: Mobile Edge Computing) である。しかし、MEC 技術は研究開発の段階であり、利用アプリケーションを含めて検討段階にある。

また、最近では、仮想現実 (VR: Virtual Reality) 技術や複合現実 (MR: Mixed Reality) 技術が発展し、これらの技術を用いて臨場感のある体験を提供するネットワークサービスが展開されつつある。例えば、結婚式の様子を遠隔地にい VR 用ヘッドセットを装着した親族に届けるサービス [2] や、スポーツ競技の会場から離れた会場に選手が現れたように感じる「超高臨場パブリックビューイング」 [3] などが考えられている。

情報ネットワークは、原則として情報ビットを運ぶシステムであり、新たなサービスが登場した場合においてもサービスで必要となる情報伝送は可能となる。しかし、1990 年代後半におけるテキスト情報の伝送から動画像情報の伝送へのパラダイムシフトに見られるように、運ぶ情報の特性に応じて、例えばリアルタイム性が要求される情報伝達には RTP (Real-time Transport Protocol) [4] などのプロトコルを導入したり、サービス品質 (QoS: Quality of Service) を高めるプロトコル制御等の導入も行われている [5]。仮想現実技術や複合現実技術を用いたネットワークサービスの登場に際し、情報ネットワークにおいても新たなプロトコルの導入・開発が求められる可能性はある。しかし、新たなプロトコルを導入するにあたっては、ユーザーの体感品質が何によって決定づけられるのかを明らかにする必要がある。実際に、仮想現実技術や複合現実技術を用いたネットワークサービスでは、ユーザーは Web ブラウザ越しに情報閲覧を行うのではなく、五感情報の臨場体験の享受を可能とすることが求められる。また、ユーザーによるジェスチャーなどの直感的な運動で近接端末や遠隔端末を操作することも考えられる。従って、ユーザーが一方的に音声や映像などの体験を享受するサービスと比べて、ネットワークの遅延やパケットロスの増大に対するユーザー体感品質の変化が大きくなる可能性がある。

そこで、本報告では、仮想現実技術／複合現実技術とエッジコンピューティングを組み合わせたアプリケーションとして、局所的に取得される実世界の情報を局所的に統合・処理を行いつつ情報伝達を行い、ユーザーに対して新たな臨場体験を提供するアプリケーションを考案し、さらにネットワークの遅延の増大に対するユーザー体感品質の変化量を実機を用いて検証する。

本報告の構成は以下の通りである。まず、2章で関連研究として複合現実技術 (MR: Mixed Reality) とエッジコンピューティング、およびユーザーの体感品質 (QoE: Quality of Experience) について述べる。次に、3.1章で本報告で想定するサービスについて述べる。次に、4章で実験方法と評価方法、および実験結果について述べる。最後に、5章でまとめと今後の課題について述べる。

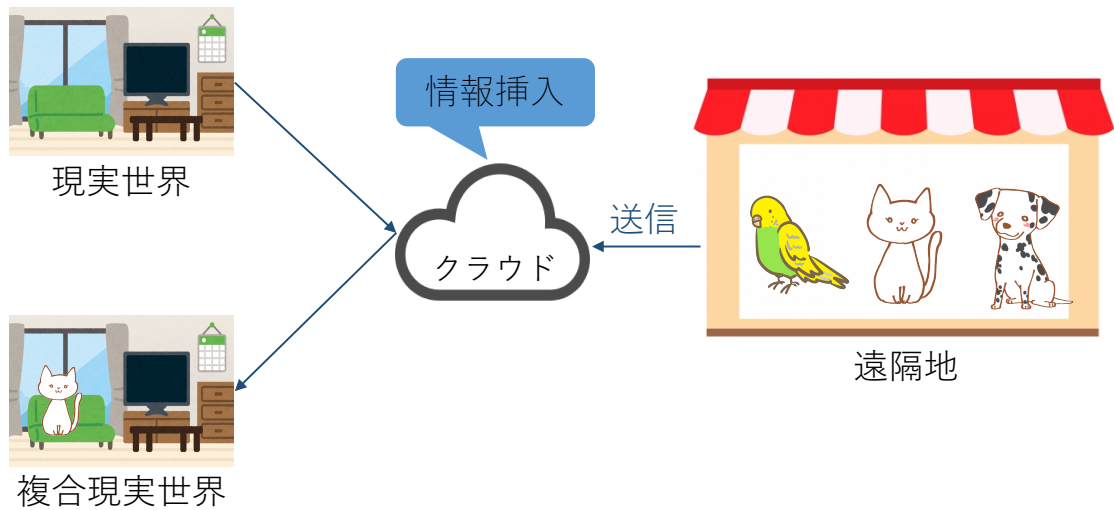


図 1: ネットワークを利用した複合現実技術の例

## 2 関連研究

本章では、本報告に関連した研究として、複合現実技術 (MR: Mixed Reality) とモバイルエッジコンピューティング (MEC: Mobile Edge Computing)、およびユーザーの体感品質 (QoE: Quality of Experience) について説明する。

### 2.1 複合現実技術 (MR)

近年、仮想現実 (VR: Virtual Reality)、拡張現実 (AR: Augmented Reality)、複合現実 (MR: Mixed Reality) といった、XR と呼ばれる技術が発展している。仮想現実技術は、現実世界から切り離された仮想の世界に入り込んだかのような体験を可能にする技術である。拡張現実技術は、現実の世界に仮想の世界を重ね合わせることで現実を拡張する技術である。

複合現実技術は、現実の世界に仮想の世界を重ね合わせるという点では拡張現実と似た技術であるが、拡張現実技術と異なり、表示されたオブジェクトに近づいて自由な角度から見たり、オブジェクトに触れたりすることができる。また、カメラやセンサーによって仮想のオブジェクトの位置をより現実的にすることができる。例えば、現実世界の物体との衝突を検出したり前後関係を判定したりすることができる。

オフラインで使用できるサービスだけでなく、図1のように XR 技術を用いて臨場感のある体験を提供するネットワークサービスが展開されつつある。実際に、結婚式の様子を遠隔地にい VR 用ヘッドセットを装着した親族に届けるサービス [2] や、スポーツ競技の会場か

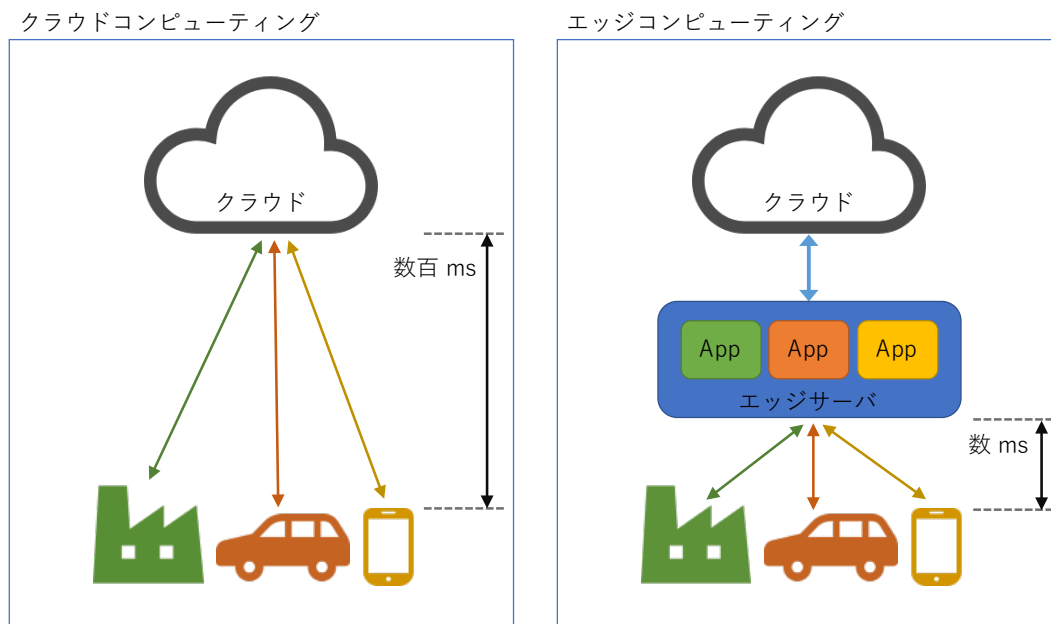


図 2: クラウドコンピューティングとエッジコンピューティング

ら離れた会場に選手が現れたように感じる「超高臨場パブリックビューイング」[3]などが考えられている。

XR 技術を用いたネットワークサービスでは、ユーザーは Web ブラウザ越しに情報閲覧を行うのではなく、五感情報の臨場体験の享受を可能とすることが求められる。また、ユーザーによるジェスチャーなどの直感的な運動で近接端末や遠隔端末を操作することも考えられる。従って、このようなサービスには高い応答性が求められる。

また、近年、ネットワークの研究分野では、エッジコンピューティングの研究開発が進められている。従来のクラウドコンピューティングでは、末端端末は遠隔地にあるデータセンターと通信を行う。その際、RTT (Round Trip Time) は国内で 100ms 以下、日米間で約 100ms、日欧間で約 200ms となる。一方、エッジコンピューティングでは、通信網のエッジである基地局などにコンピューティングリソースやストレージを配備することで、末端端末が必要とする処理をより末端端末に近い場所で行う。これにより、遅延を抑え、アプリケーションの応答性が改善されることが期待されている [1]。例えば、カメラやセンサーなどを搭載した端末において取得された実世界の情報を、別拠点のデータセンターへ転送することなく、局所的に統合・処理を行うことが期待される。

エッジコンピューティングにおいてモビリティをサポートするのがモバイルエッジコンピューティング (MEC: Mobile Edge Computing) である。MEC は、ETSI (European

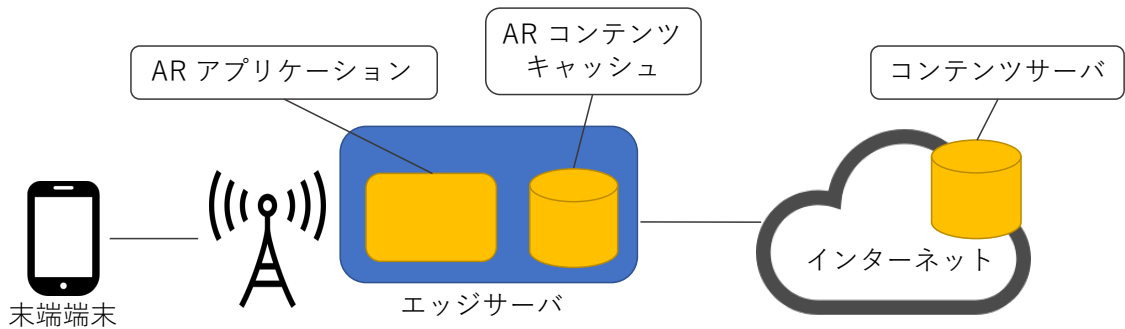


図 3: エッジコンピューティングを用いた AR コンテンツの配信

Telecommunications Standards Institute) によって標準化が進められている。

文献 [6] では、モバイルエッジコンピューティングのユースケースとして、図 3 のような AR コンテンツの配信アプリケーションを挙げている。AR コンテンツをエッジサーバにキャッシュしておくことで、RTT を最小限に抑え、スループットを最大化することができる。

## 2.2 ユーザー体感品質 (QoE)

従来、通信サービスの品質を表すために QoS (Quality of Service) が用いられてきた。QoS は通信遅延やパケットロスなどの数値を用いて表される。QoS を高めるプロトコル制御等の導入も行われている [5]。

しかし、QoS はネットワークの提供者から見た品質であり、QoS のみではユーザーの体感品質は測定できない。これは、ユーザーの体感品質が通信の品質だけでなくアプリケーション自体の使い勝手やユーザーの心理的要因や状況要因によっても決定されるからである。

そこで、国際電気通信連合 (ITU: International Telecommunication Union) は 2007 年 1 月にユーザーの体感品質を表す用語として QoE (Quality of Experience) を定義した [7]。

ユーザーの体感品質を測定する方法として、平均オピニオン評点 (MOS: Mean Opinion Score) がある。各評価者が各評価対象に対して絶対評価 (ACR: Absolute Category Rating) や比較評価 (Cmparison Category Rating) などの評価を行い、評点の平均値でユーザーの体感品質を表す。絶対評価における評価カテゴリと評点を表 1 に、比較評価における評価カテゴリと評点を表 2 に示す。

表 1: ACR 評価カテゴリ

カテゴリ	評点
非常に良い (Excellent)	5
良い (Good)	4
普通 (Fair)	3
悪い (Poor)	2
非常に悪い (Bad)	1

表 2: CCR 評価カテゴリ

カテゴリ	評点
非常に良くなった (Much Better)	3
良くなった (Better)	2
わずかに良くなった (Slightly Better)	1
同じ (About the Same)	0
わずかに悪くなった (Slightly Worse)	-1
悪くなった (Worse)	-2
非常に悪くなった (Much Worse)	-3

映像や音声に関する体感品質を評価するための実験環境や手順、評価基準などは文献 [8, 9] で勧告されている。しかし、仮想現実技術や複合現実技術を用いたアプリケーションは、単に映像や音声を享受するだけではなく五感の情報を享受したり、ユーザーがジェスチャーにより端末を操作したりすることが考えられるため、文献 [8, 9] で勧告されている方法では不十分であり、臨場感などのユーザーの感性を多次的に捉える必要がある [10]。



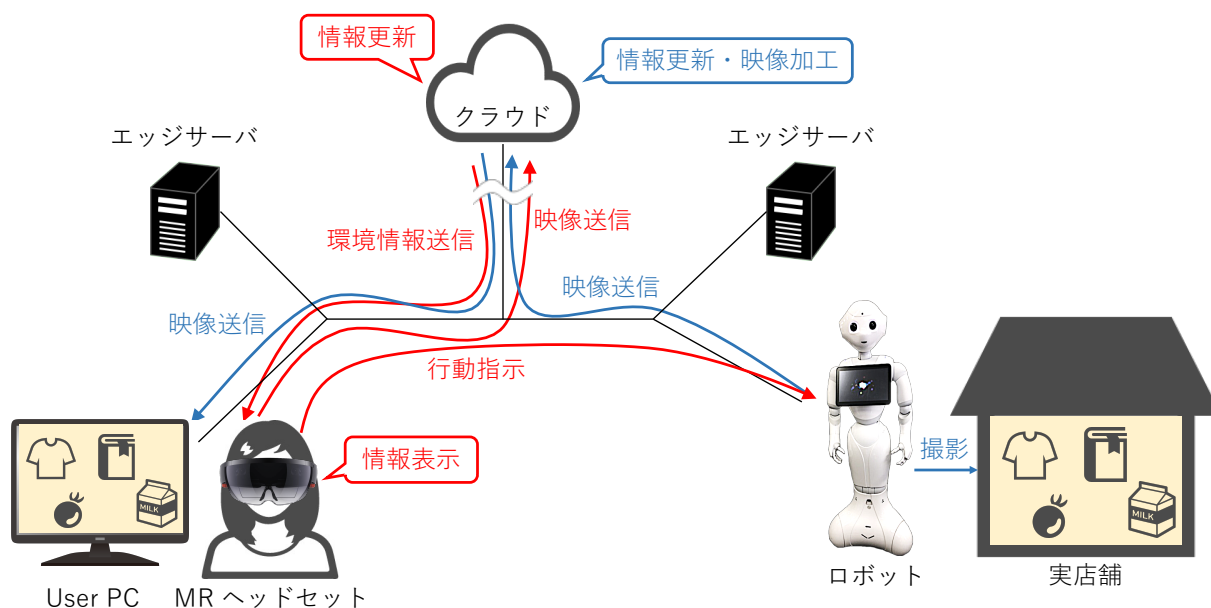


図 4: サービスイメージ図: クラウドコンピューティング

### 3 ネットワークを利用した複合現実型サービス

本章では、本報告で想定するネットワークを利用した複合現実型サービスについて述べる。3.1 節では想定するサービスの全体像について述べ、3.2 節では実装したアプリケーションプログラムについて述べる。

#### 3.1 想定するサービス

想定するサービスは、図 4 に示すような、複合現実技術を用いたショッピングモール体験サービスである。現実世界のショッピングモールにロボットを配置し、ユーザーが遠隔地からそのロボットを操作することで実際の店舗を見て回って買い物をしているかのような体験を行うことができる。このサービスでは、ロボットの移動や MR ヘッドセットを装着したユーザーの環境情報の更新に合わせて映像加工処理を行う必要があるため、高い応答性が必要となる。そのため、図 5 のようなエッジコンピューティング環境を想定している。

ロボットは実際の店舗の様子を撮影し、エッジサーバに送信する。ロボット側のエッジサーバには以下のようなショッピングモールの環境情報が蓄積されている。

- 商品の在庫

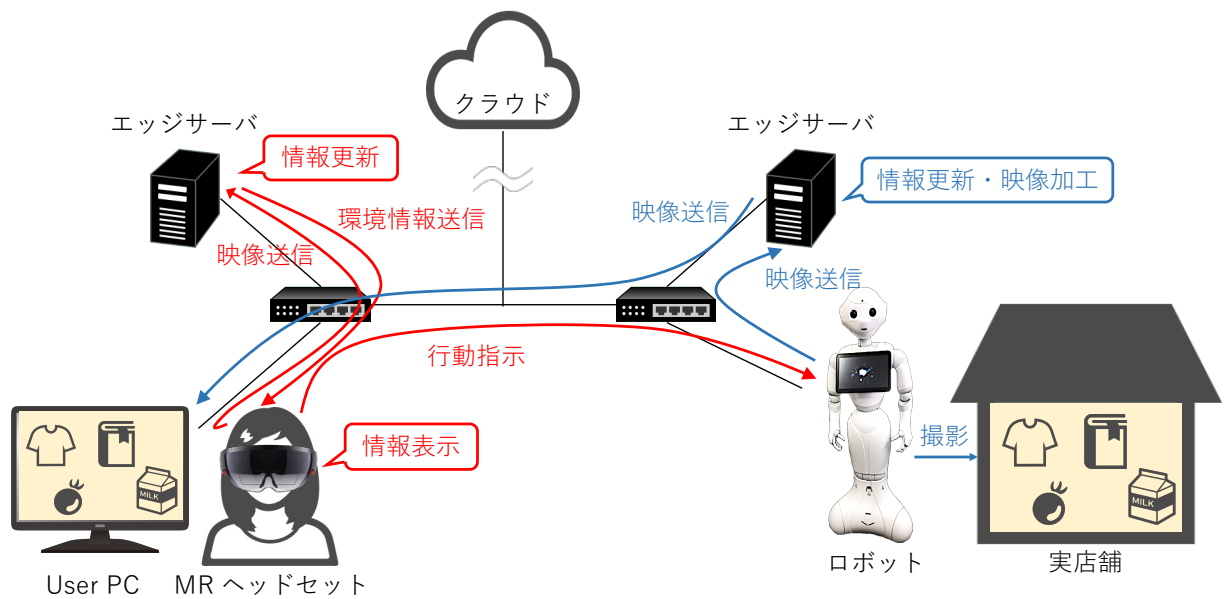


図 5: サービスイメージ図: エッジコンピューティング

- 売れ筋の商品
- 新発売の商品
- 店舗別特典の内容

エッジサーバでは、適宜環境情報の更新を行う。また、ロボットの移動に合わせて随時適切な環境情報を映像に挿入してユーザーに送信する。ロボットの映像を処理しユーザーに送信する過程を図6に示す。このとき、映像や音声だけではなく、匂いや商品の触感のような五感の情報もユーザーに送信することで、臨場感のある体験を提供する。

一方、ユーザーはMRヘッドセットを装着しており、そのMRヘッドセットには以下のようなユーザー側の環境情報が表示される。

- 冷蔵庫にあるもの・ないもの
- 冷蔵庫にあるものの賞味期限
- 電池などの普段使っている日用品の大きさや種類

ユーザー側の環境情報はユーザーの自宅にあるエッジサーバに蓄積されており、MRヘッドセットがエッジサーバに映像を送信することで自動的に環境情報が更新される。

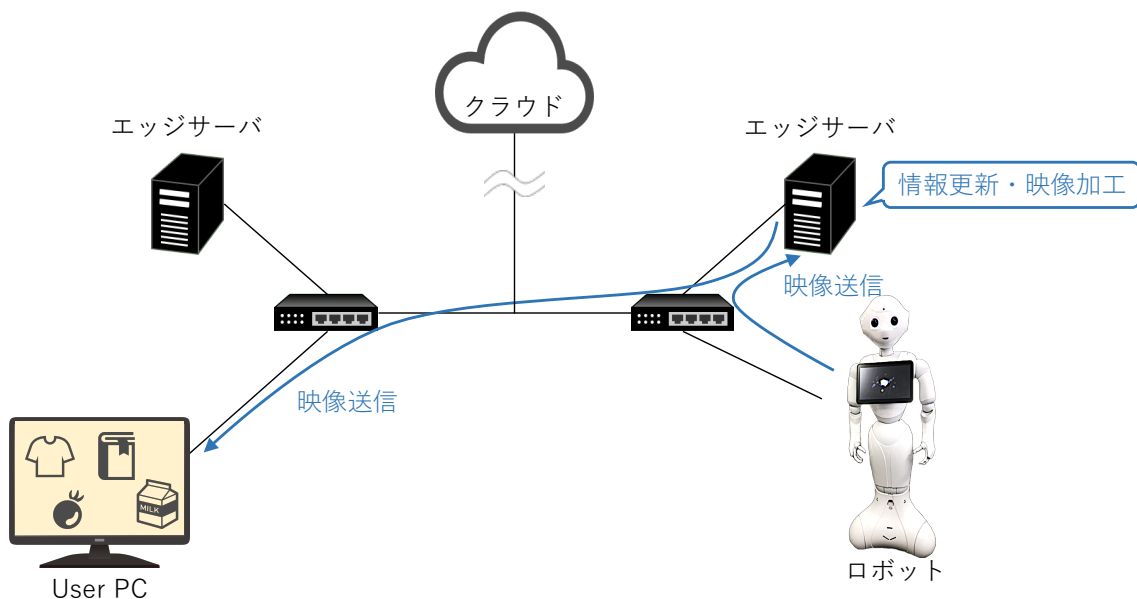


図 6: 想定するロボット側の処理

ユーザーは、遠隔地のロボットから送られてくる映像と MR ヘッドセットのレンズ上に表示される情報を見ながらジェスチャーや音声によりロボットを操作する。ユーザー側で行われる処理を図 7 に示す。

### 3.2 実装したアプリケーションプログラム

実装したアプリケーションプログラムは、ロボットのカメラで撮影している映像とその映像上に表示された情報、MR ヘッドセット上に表示された情報を見ながらジェスチャーでロボットを移動させるプログラムである。以下、ユーザー側、ロボット側のそれぞれについて述べる。

#### ユーザー側

実装したユーザー側のアプリケーションにおける処理を図 8 に示す。また、ユーザーがアプリケーションを使用中の MR ヘッドセット越しの視界のイメージを図 9 に示す。

これらの情報を表示するオブジェクトは、ホワイトボードのようなオブジェクトで、アプリケーションの起動時に MR ヘッドセット上に表示される。MR ヘッドセットは定期的に

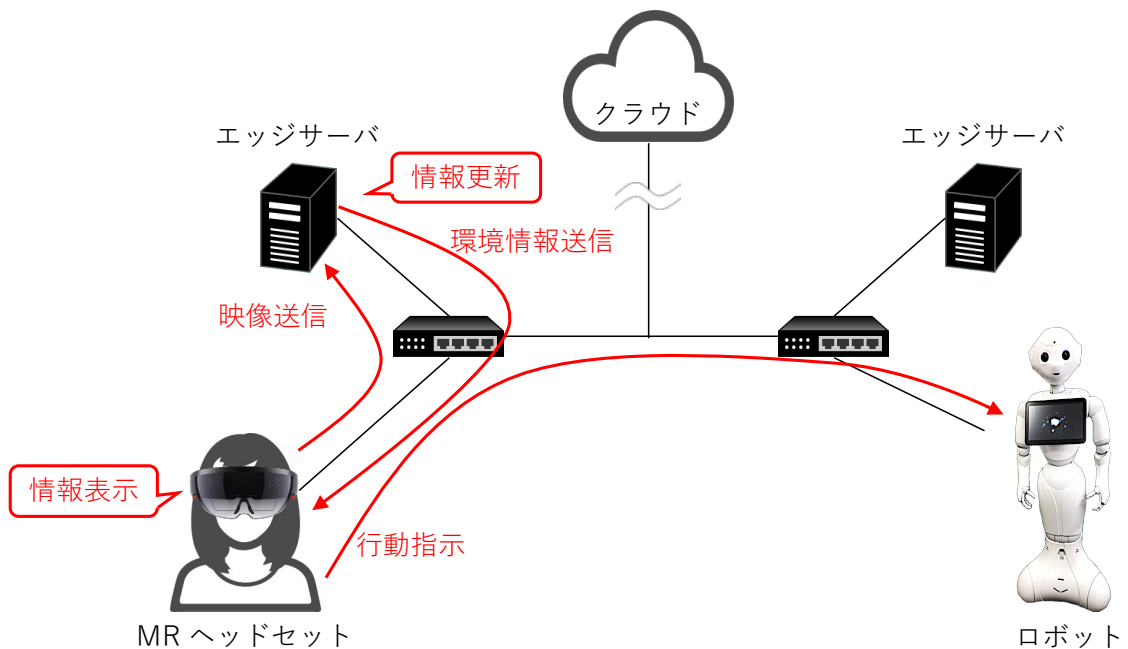


図 7: 想定するユーザー側の処理

表 3: 指ジェスチャーとロボットの方向の対応

指	Pepper
上	前
下	後
左	左
右	右

HTTP でエッジサーバの Web サーバにある環境情報を取得し、その内容をホワイトボード上に表示する。環境情報の内容を更新する際は手動でテキストファイルを書き換える。

また、MR ヘッドセットで指の動きを検知し、スワイプ操作によってロボットに歩行移動をさせる。一本の指を上から下に下げ、指を下げたまま上下左右のいずれかに動かした後、指を上に戻すと、ジェスチャーが確定する。指の動いた距離が閾値を越えると表 3 に示す方向にロボットが歩行する。ロボットが一度に動く距離は、指の動いた距離の 6 倍である。閾値を超えないスワイプ操作およびタップ操作では、ロボットが時計回りに 90 度回転する。

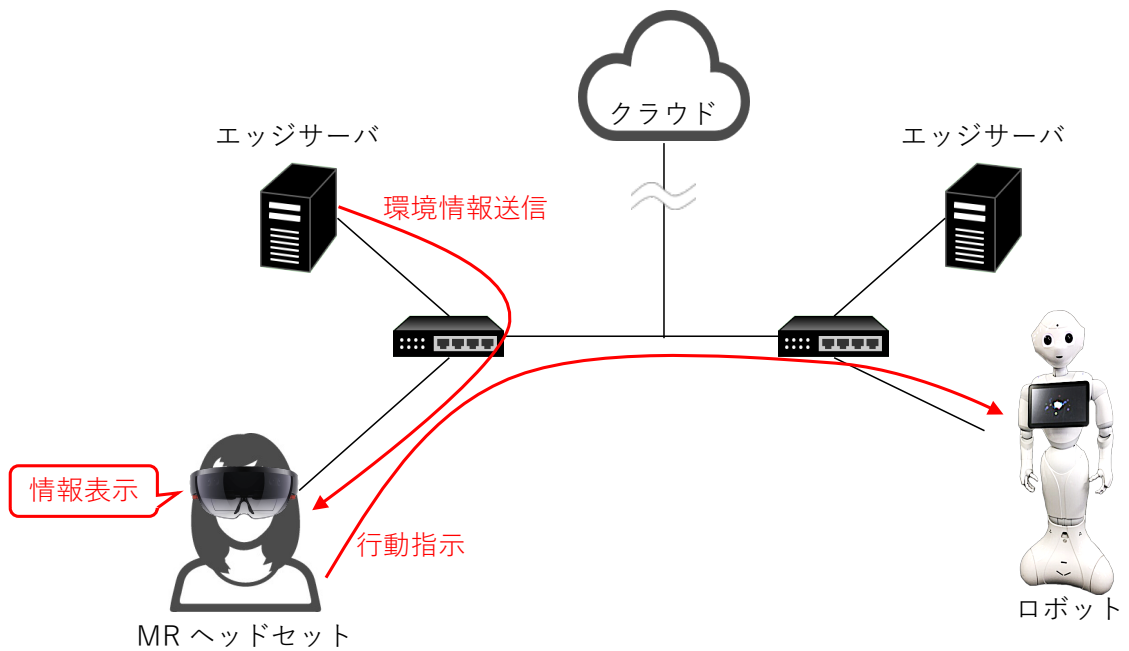


図 8: 本報告におけるユーザー側のアプリケーションでの処理

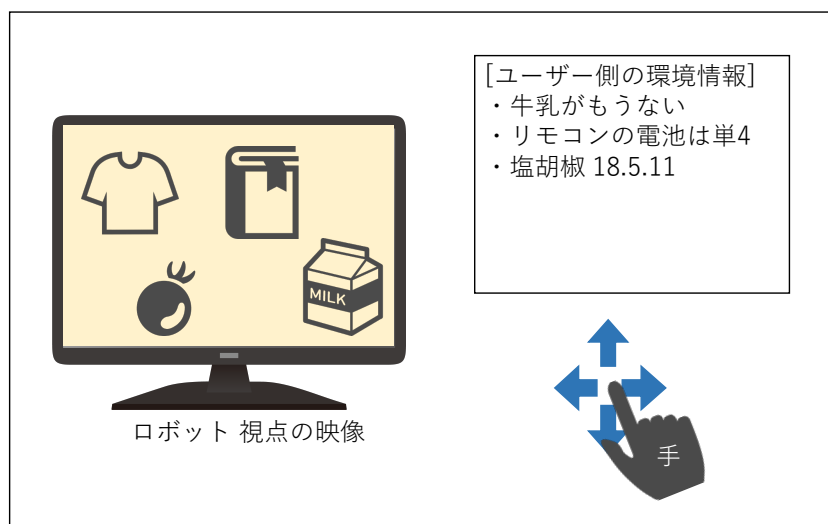


図 9: ユーザーの視界イメージ

本報告では、ロボットとしてソフトバンクロボティクスの Pepper を用いる。Pepper とは、感情を認識することができるヒューマノイドロボットである。Pepper では様々な API

(Application Programming Interface) が提供されており、Pepper 上で動作するアプリケーションの作成や外部アプリケーションとの連携を行うことができる。また、メッセージングフレームワークとして qi Framework が公開されている。本プログラムでは、MR ヘッドセット上で動作するアプリケーションから Pepper に接続し、Pepper の移動を提供する API である ALmotion API を用いて Pepper の移動を実現している。

また、MR ヘッドセットとして Microsoft HoloLens を用いる。HoloLens とは、ヘッドマウントディスプレイ型の自己完結型ウェアラブルコンピュータである。Hologram と呼ばれる仮想オブジェクトを現実世界と重ね合わせて表現することができる。また、Hologram は視線やジェスチャー、音声によって操作することが可能である。

HoloLens アプリケーションの開発は Unity を用いて C# で行う。C# と Pepper の連携は標準ではサポートされていないため、qi Framework を .NET/C# から使用できるようにする Baku.LibqiDotNet ライブラリ [11] を Unity 向けにしたものを用いる。プログラム内でロボットの IP アドレスを指定し、TCP で接続する。

HoloLens には手の位置やタップ操作を検出する機能が搭載されている。タップ開始時と終了時それぞれの手の位置から手の移動量距離を計算し、Pepper の移動距離を決定する。

## ロボット側

本報告でのロボット側の処理内容を図 10 に示す。ロボットは、周囲の様子を撮影し、エッジサーバに送信する。エッジサーバにはロボット側の環境情報が蓄積されており、その情報を送られてきた映像上にテキストとして表示する。表示するテキストの内容を変更したい場合は手動でテキストファイルの内容を書き換える。

ロボットが撮影した映像の処理の流れを図 11 に示す。以下、撮影した映像の取得・加工・配信には、ffmpeg [12] を用いる。ffmpeg は、映像の記録や加工などを行うことができるフリーソフトウェアである。ffmpeg は Pepper の OS である NAOqi に標準搭載されているが、標準搭載されている ffmpeg ではネットワーク経由で映像をストリーミングすることができないため、ネットワーク経由でのストリーミングが可能なものと置き換えて使用する。Pepper 内部の ffmpeg では、取得した映像をエッジサーバに送信する。エッジサーバの ffmpeg (1) では、Pepper から受け取った映像にテキストを挿入する。ffmpeg (2) では映像を ffserver に送信する。ffmpeg での映像の送信には UDP を使用する。

映像のストリーミング配信には、ffserver を用いる。ffserver は ffmpeg に付属するストリーミングサーバであり、ASF や SWF、MPEG など様々なフォーマットに対応している。

ffserver で配信される映像の再生には、ffmpeg 付属の再生ソフトウェアである ffplay を用いる。ストリーミング配信される映像をバッファリングする機能を持つ。しかし、本報告で

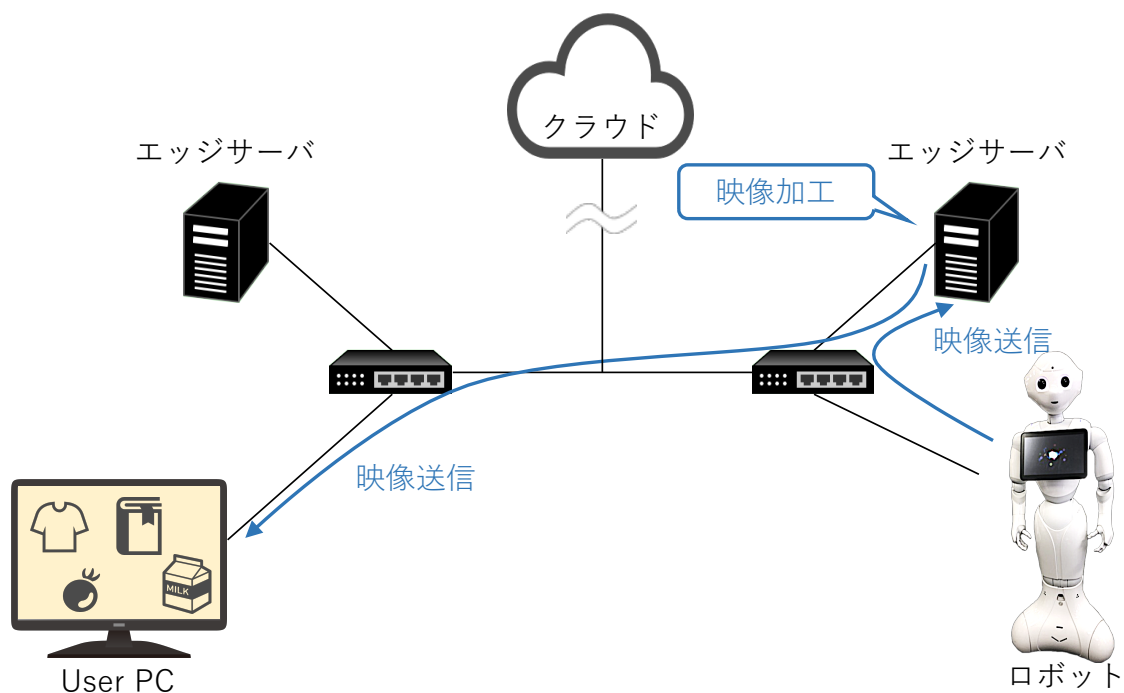


図 10: 本報告におけるロボット側の処理

は、映像のバッファリングによる遅延を抑えるため、バッファサイズを最小に設定して使用する。

### 3.3 アプリケーションの実行例

実際にアプリケーションを使用している様子のスクリーンショットを図 12 に示す。青色で囲んだ領域がロボット視点の映像、赤色で囲んだ領域がMR ヘッドセットのレンズ上に表示されるユーザー側の環境情報である。

ユーザー側の環境情報を更新される、もしくはロボット側の環境情報が挿入されると、図 13 のように表示される。

## 4 複合現実型サービスにおけるユーザーの体感品質の評価

本章では、まずユーザーの体感品質を評価するための実験環境および評価方法について述べる。次に、実験結果について述べる。

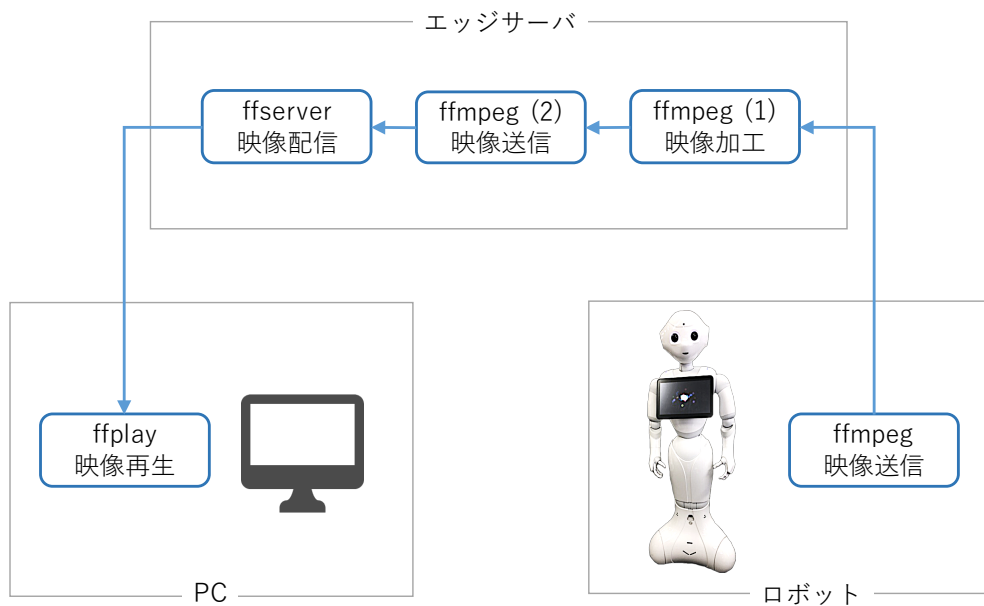


図 11: ロボット側の映像処理の流れ

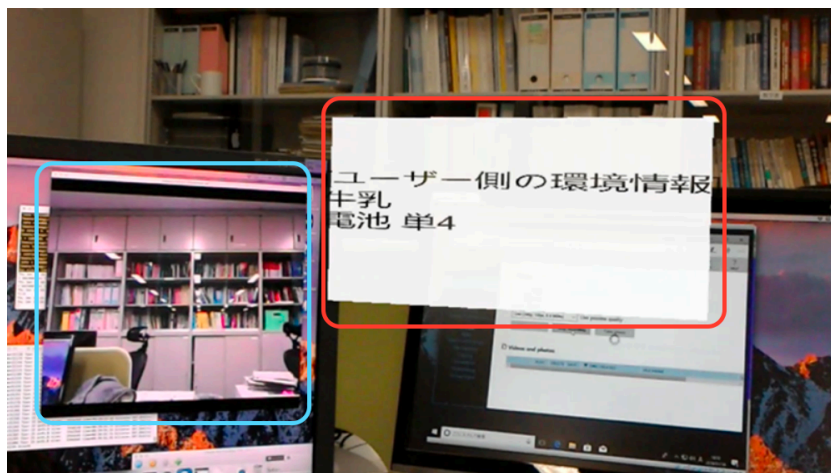


図 12: アプリケーションの実行例：情報更新前

#### 4.1 実験環境

実験用のネットワーク構成を図 14 に示す。ネットワーク環境は、仮想化環境構築ソフトウェアである OpenStack [13] を用い、文献 [14] で構築されているものを参考に構築する。使用した OpenStack のバージョンは Ocata である。使用した仮想マシンの諸元を表 4 に示



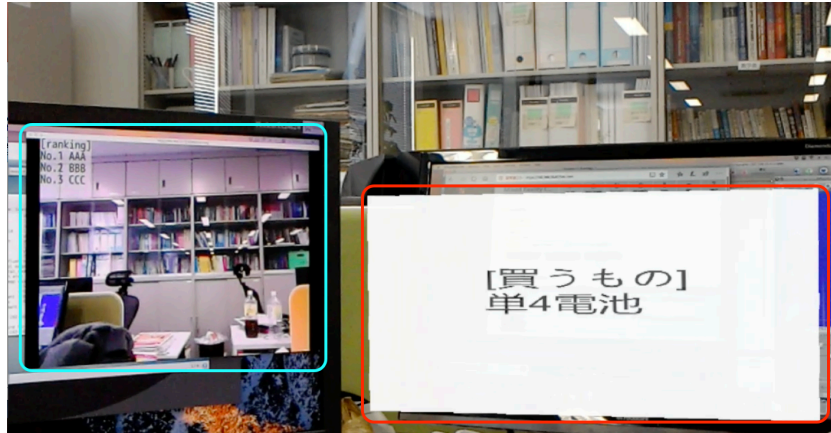


図 13: アプリケーションの実行例：情報更新後

表 4: 仮想マシンの諸元

CPU コア数	2
メインメモリ	4 GB
ストレージ	32 GB
ネットワークインタフェースの帯域幅	最低 1 Gbps
OS	CentOS 7

表 5: ロボットの諸元

CPU コア数	4
CPU クロック周波数	1.91 GHz
メインメモリ	4 GB
OS	NAOqi 2.5.5 (Gentoo Linux ベース)
無線通信	IEEE 802.11 a/b/g/n

す。また、ロボット Pepper の諸元を表 5 に、ロボットが撮影する映像の諸元を表 6 に示す。

ロボットが映像を撮影してエッジサーバに送信するまでの処理に、420 [ms] 程度の遅延が発生している [14]。この遅延と通信にかかる遅延に加え、VM でネットワークに遅延を発生させる。VM で発生させる遅延は、クラウドコンピューティング環境で発生する遅延を模

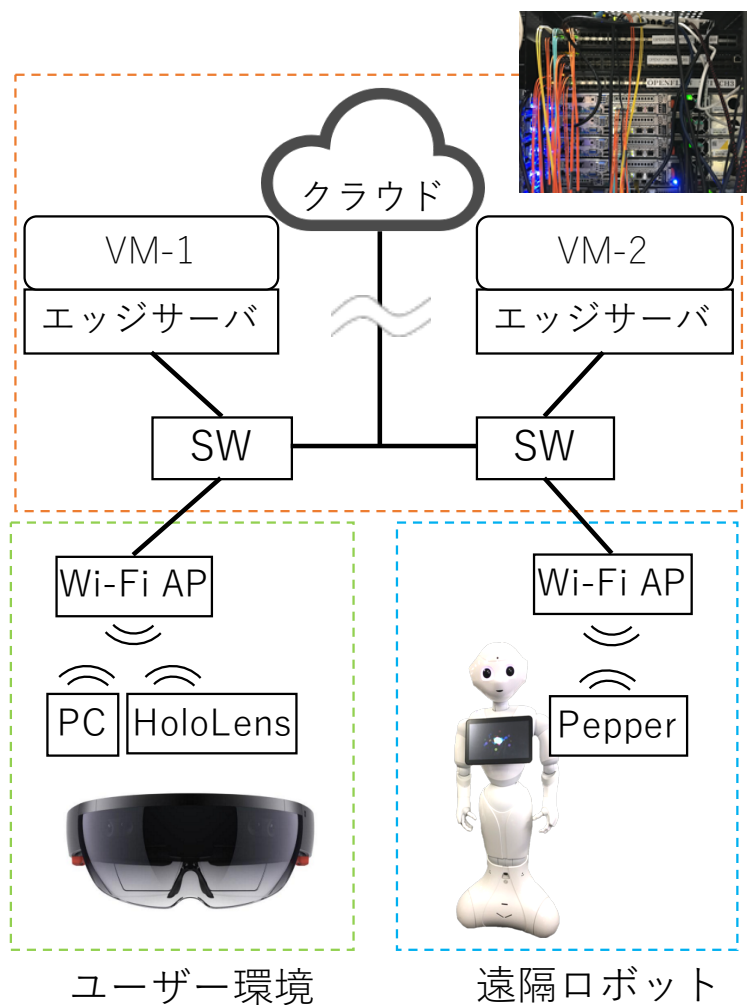


図 14: 実験用ネットワーク構成

表 6: 映像の諸元

コーデック	mpeg2video
フォーマット	MPEG
解像度	640x480
フレームレート	30 fps
ビットレート	3 Mbits

表 7: ユーザーに与えるタスクと参照する環境情報

タスク	参照する情報	操作内容
1	なし	2 [m] 程度先の目印に移動
2	ユーザー側	環境情報で与えられた目標地点に移動
3	ロボット側	環境情報で与えられた目標地点に移動
4	ユーザー側・ロボット側	両方の環境情報で与えられた目標地点移動

擬的に発生させたものである。遅延の発生には、netem [15] を用いる。netem は NIST Net [16] が発展したネットワークエミュレータであり、ネットワークの遅延を発生させることができる。

予備実験として、VM での遅延が 0 [ms]、100 [ms]、200 [ms]、300 [ms]、400 [ms]、500 [ms] の場合のタスク完了時間を測定した。

次に、本実験として 8 人の被験者に表 7 のタスクを与え、遅延の大きさが変化した場合のタスク完了時間の変化を測定した。各タスクはタスク 1 から 4 の順に、それぞれ 1 回目に遅延なしの場合、2 回目に遅延なしの場合を実行した。8 人の被験者を 4 人ずつのグループに分け、一方のグループでは 300 [ms] のネットワーク遅延、もう一方のグループでは 500 [ms] のネットワーク遅延を発生させた。

## 4.2 評価方法

ユーザーの体感品質を主観的に評価する方法として、平均オピニオン評点 (MOS: Mean Opinion Score) [8] がある。ただし、文献 [8] で述べられている評価方法はビデオやオーディオ向けの評価方法であり、複合現実型サービスにおける体感品質の評価方法は確立されていない。そこで、本報告では、以下の方法で評価を行う。

- 客観評価として、各タスクの完了に要した時間を測定する。
- ユーザーによるシステムの主観評価として、すべてのタスクの実行が終了した後、以下の項目に関して 1 回目 (遅延なし) の実行と比較して 2 回目 (遅延あり) の実行がどのように変わったと感じるかを表 8 のカテゴリで評価し、平均オピニオン評点 (CMOS: Comparison Mean Opinion Score) で表す。

表 8: 評価カテゴリ

カテゴリ	評点
非常に良くなった (Much Better)	3
良くなった (Better)	2
わずかに良くなった (Slightly Better)	1
同じ (About the Same)	0
わずかに悪くなった (Slightly Worse)	-1
悪くなった (Worse)	-2
非常に悪くなった (Much Worse)	-3

E1: ロボットが撮影する映像の品質

E2: ロボット操作の快適性

E3: 没入感

E4: MR ヘッドセットに表示された情報の見やすさ

E5: ロボットが撮影する映像に表示される情報の見やすさ

### 4.3 実験結果

まず、予備実験の結果を図 15 に示す。

次に、本実験の結果を示す。各ネットワーク遅延時間とタスク完了時間の関係を図 16、図 17、図 18、図 19 に示す。また、ユーザーの主観評価の平均値を図 20 に示す。

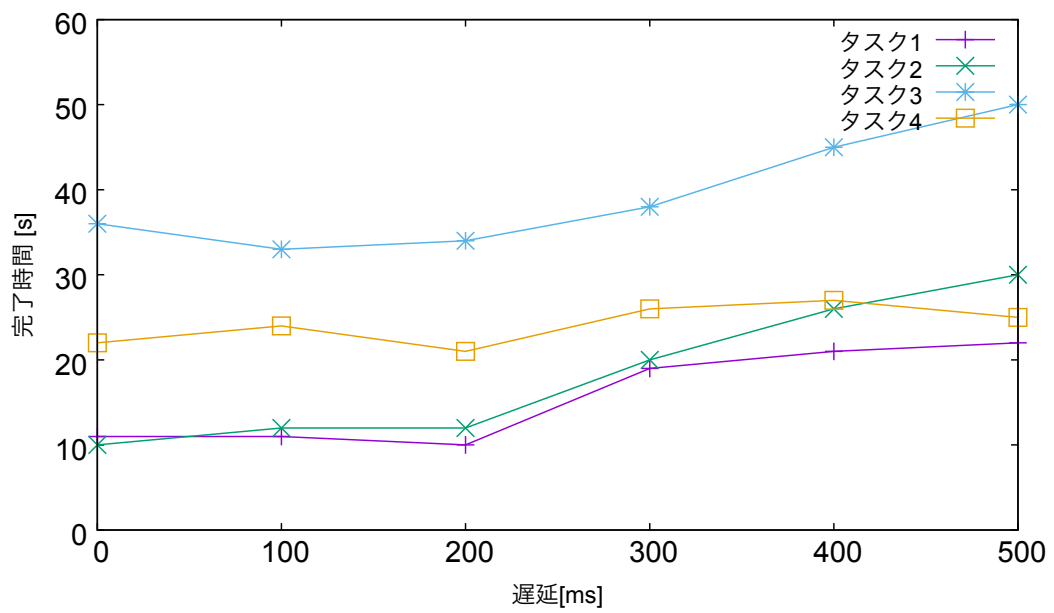


図 15: 予備実験の結果

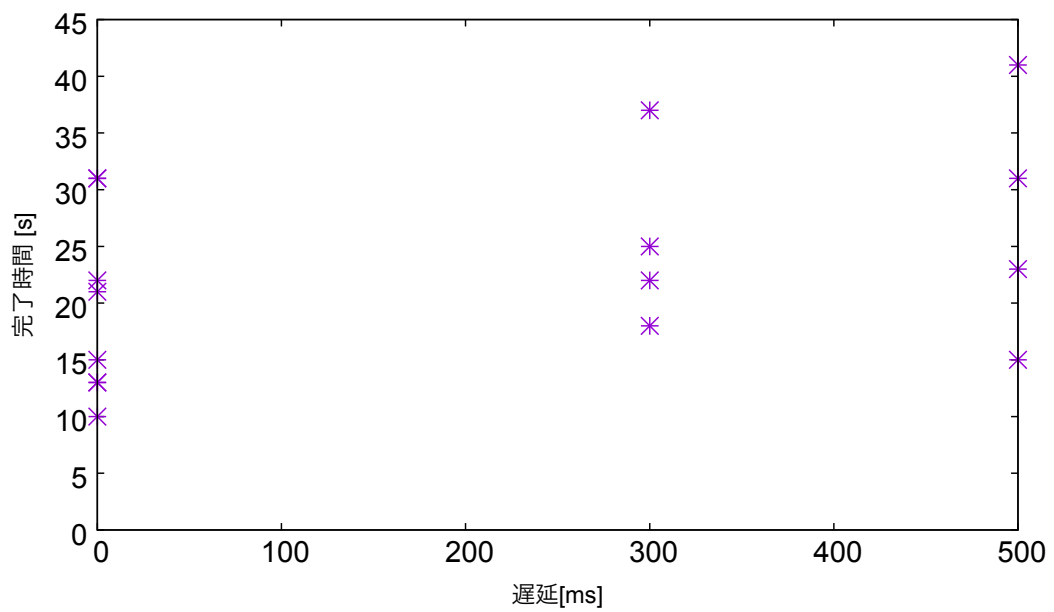


図 16: タスク1のネットワーク遅延とタスク完了時間

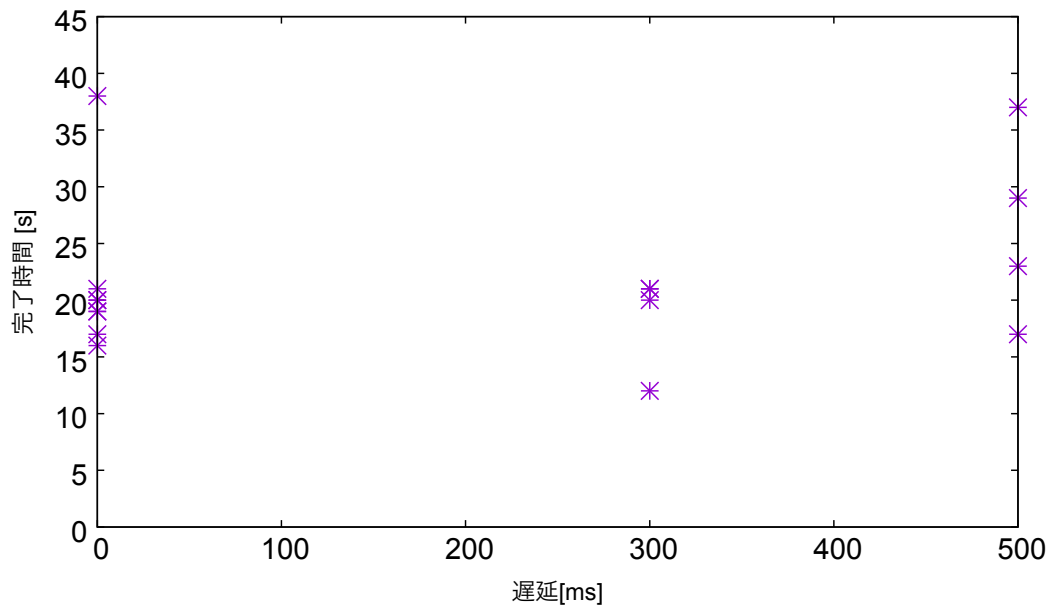


図 17: タスク 2 のネットワーク遅延とタスク完了時間

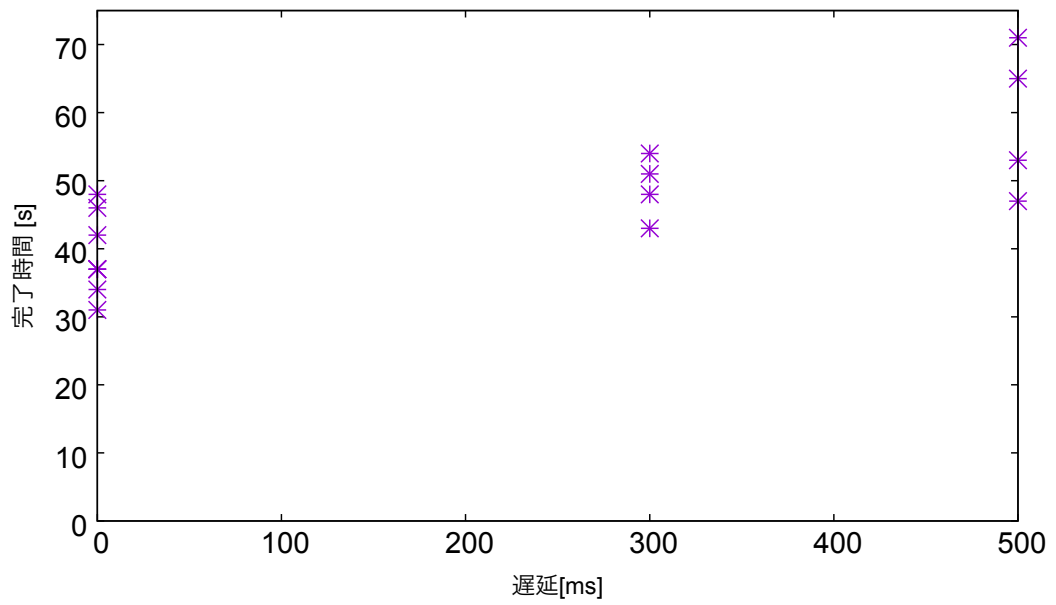


図 18: タスク 3 のネットワーク遅延とタスク完了時間

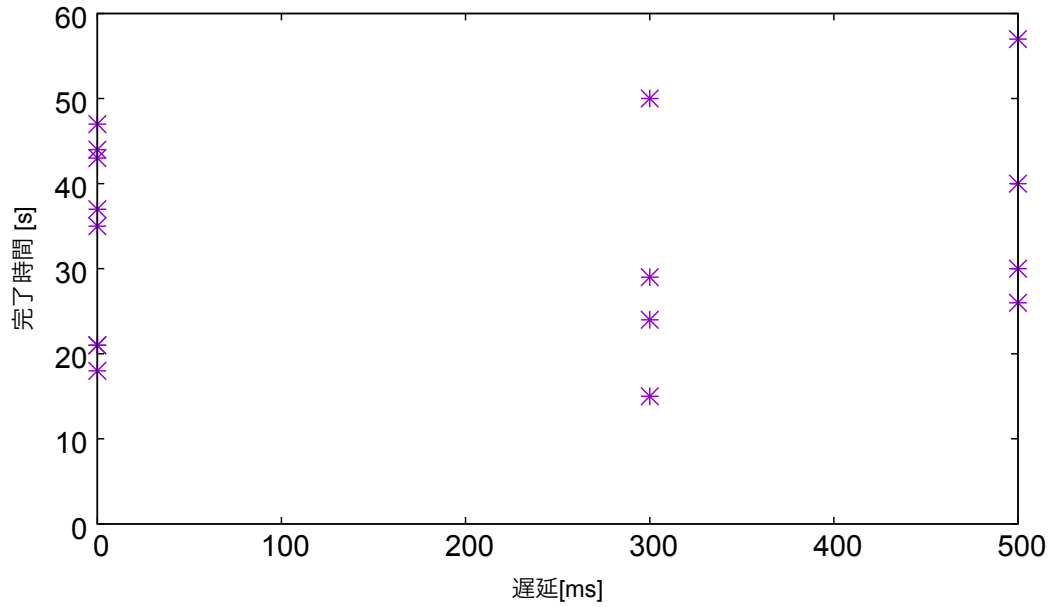


図 19: タスク 4 のネットワーク遅延とタスク完了時間

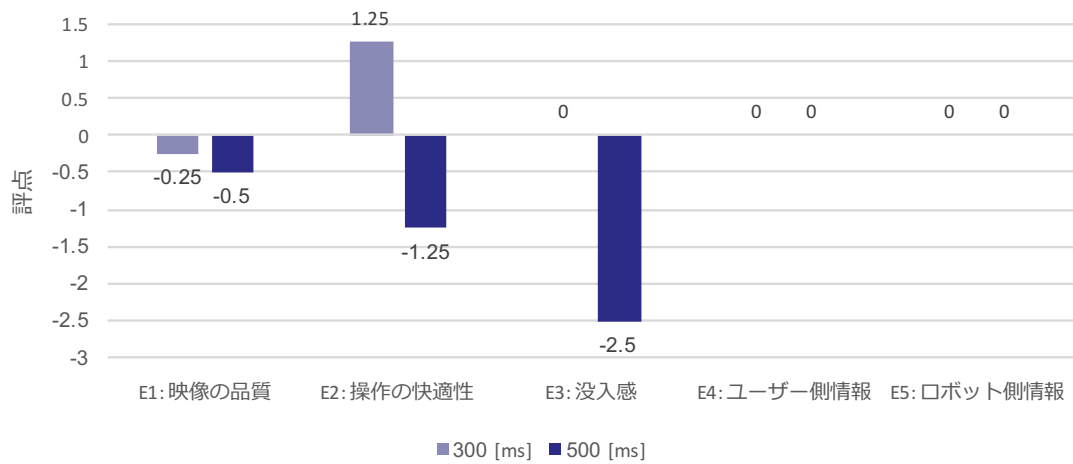


図 20: ユーザーの主観評価

以上の実験結果から、以下のようなことが言える。

- タスク完了時間は、予備実験・本実験で同様の結果が得られており、遅延の増大に対してほぼ線形に増大している。
- E1 に関して、遅延が 300 [ms] の場合と 500 [ms] の場合の両方でやや悪化している。本実験において被験者が映像の劣化を感じるのは、ジェスチャーが確定してからロボットが移動しているように見えるまでの時間が増大するという点のみであるため、遅延の増大に対して線形に悪化しているのは妥当である。
- E2 に関して、遅延が 300 [ms] の場合では上昇している。これは、同じ内容のタスクを 2 回繰り返したために、操作への慣れやタスク内容を覚えたことによる効果が、遅延による影響を上回ったためと考えられる。一方、500 [ms] の場合は、同じ内容のタスクを繰り返していても、慣れによる効果を遅延による影響が上回ったため、評点が低下したと考えられる。
- E3 に関して、遅延が 300 [ms] の場合は変化がなかったのに対し、遅延が 500 [ms] の場合では著しく悪化している。このことから、遅延が 300 [ms] から 500 [ms] の間でユーザーの体感品質が急激に低下すると考えられる。本報告で用いたロボット内での処理遅延は約 420 [ms] であることから、ユーザー・ロボット間の遅延が 720 [ms] から 920 [ms] の間でユーザーの体感品質が急激に低下すると考えられる。したがって、クラウドコンピューティング環境で遅延が約 1 秒となるサービス環境では、エッジコンピューティングを導入することでユーザーの体感品質が向上すると見込まれる。
- E4 および E5 では、遅延の大きさが変化しても評価は変化しなかった。本実験では、ユーザー側で表示される情報とロボット側で表示される情報は操作中に変化しないため、ネットワーク遅延の影響を受けない。



## 5 おわりに

仮想現実技術や複合現実技術を用いたネットワークサービスでは、ユーザーはWebブラウザ越しに情報閲覧を行うのではなく、五感情報の臨場体験の享受行ったり、ジェスチャーなどの直感的な運動で近接端末や遠隔端末を操作することが考えられる。しかし、そのような状況でのユーザーの体感品質が悪化する要因や体感品質の変化量はまだ検証されていない。また、アプリケーションの応答性を高めるためにエッジコンピューティングの標準化が進められている。以上を踏まえ、本報告では複合現実技術を用いたアプリケーションを作成し、エッジコンピューティング環境でクラウドコンピューティング環境で発生する遅延を模擬的に発生させ、ネットワーク遅延の大きさとユーザーの体感品質の関係を検証した。検証の結果、タスク完了時間はネットワーク遅延の増大に対して線形に増大するが、遅延が720 [ms] から 920 [ms] の間でユーザーの体感品質が急激に悪化することがわかった。したがって、ロボット操作アプリケーションにおいて、クラウド利用時に約1秒の遅延が発生するサービス環境では、エッジコンピューティングの導入によりユーザーの体感品質が向上すると見込まれる。

今後の課題としては、ユーザー側・ロボット側で表示される情報が動的に変化する場合の体感品質の評価、アプリケーションのユーザーインターフェースの改良、視覚だけでなく音声などの五感情報の送信によるさらなる臨場体験の提供を可能にすること、実験で発生させるネットワーク遅延を細分化しユーザーの体感品質が低下する閾値を検証することが挙げられる。

## 謝辞

本報告を終えるにあたり、日頃より熱心にご指導、ご教授くださいました大阪大学大学院情報科学研究科の村田正幸教授に深謝いたします。また、大阪大学大学院情報科学研究科の荒川伸一准教授には、的確なご指摘やご助言を通して、研究の具体的な方向性を示していただきました。心より感謝申し上げます。また、平素からご指導くださいました大阪大学大学院情報科学研究科の大下裕一助教、大阪大学大学院経済学研究科の小南大智助教に深謝いたします。また、日頃から親身にご指導くださいました井上昂輝氏、金田純一氏をはじめとする研究室の皆様へ深く感謝申し上げます。最後に、様々な面で支えてくださった家族、友人の皆様へ感謝の意を表して謝辞といたします。

## 参考文献

- [1] 田中 裕之, 高橋 紀之, 川村 龍太郎, “IoT時代を拓くエッジコンピューティングの研究開発,” *NTT技術ジャーナル*, pp. 59–63, Aug. 2015.
- [2] “HUG PROJECT.” <https://hugproject.net/>.
- [3] 窪蘭 竜二, 阿久津 明人, 松浦 宣彦, 南 憲一, 小野 朗, “Beyond 2020:高臨場 UX サービスの創出,” *NTT 技術ジャーナル*, pp. 6–9, Oct. 2017.
- [4] 白川 雅一, “IP プラットフォーム上の通信新技術の動向,” *東芝レビュー*, pp. 32–37, Feb. 2005.
- [5] I. Busse, B. Deffner, and H. Schulzrinne, “Dynamic QoS control of multimedia applications based on RTP,” *Computer Communications*, vol. 19, pp. 49–58, Jan. 1996.
- [6] ETSI, “Mobile-edge Computing Introductory Technical White Paper,” Sept. 2014.
- [7] International Telecommunication Union, “Recommendation ITU-T P.10/G.100, Vocabulary for performance, quality of service and quality of experience.”
- [8] International Telecommunication Union, “Recommendation ITU-T P.800, Methods for subjective determination of transmission quality.”
- [9] International Telecommunication Union, “Recommendation ITU-T P.910, Subjective video quality assessment methods for multimedia applications.”
- [10] 林 孝典, 高橋 玲, 吉野 秀明, “マルチメディア通信サービスの QoE 評価技術に関する動向と課題,” *電子情報通信学会論文誌*, vol. 91, pp. 600–612, June 2008.
- [11] “Bakulibqidotnet.” <https://github.com/malaybaku/BakuLibQiDotNet>.
- [12] “FFmpeg.” <https://www.ffmpeg.org/>.
- [13] “Openstack.” <https://www.openstack.org/>.
- [14] 金田 純一, 荒川 伸一, 村田 正幸, “エッジコンピューティング環境におけるサービス機能の配置がユーザの通信品質に与える効果の評価,” *電子情報通信学会技術研究報告*, vol. 117, pp. 61–66, Sept. 2017.

[15] “networking: netem.” <https://wiki.linuxfoundation.org/networking/netem>.

[16] “NIST Net.” <https://www-x.antd.nist.gov/nistnet/>.