インタラクティブ操作とAR可視化を実現する立体視聴プラットフォーム

粕谷　貴司[1,2,a)]　曽根　卓朗[5,4]　塚田　学[1]　安藤　亮介[3]　白浜　妥知[4]　庄子　琢郎[4]
江崎　浩[1]

概要：Internet of Things (IoT) の技術進展によって，視聴空間における視聴者の動きなど様々な要素がリアルタイムに情報空間に取り込まれるようになってきた．さらに，オブジェクトベースの立体音響システムでは 3 次元の情報空間上の音声オブジェクトをリアルタイムに視聴空間にレンダリングできるようになってきている．本研究では，IoT を活用することで，インタラクティブな音声視聴を可能とするネットワーク化された立体視聴プラットフォームの開発・評価を行った．また，スマートフォンやタブレット端末などの民生品と Augumented Reality(AR) を活用して，プラットフォーム上でインタラクティブな立体音響操作を実現するアプリケーションを開発した．これらのシステムを，Interop 2019 にて展示し，45 人の主観評価を実施することで，その有効性を確認した．

キーワード：AR，音声可視化，インタラクティブ，オブジェクト方式，立体音響，インターネット

3D audio platform for interactive manupilation and AR visualization

Abstract: With the advancement of Internet of Things (IoT) technology, various elements such as viewer movement have been incorporated into the virtual space in real-time. Furthermore, in object-based audio systems, sound objects in a 3D virtual space can be rendered in real-time. In this research, we developed and evaluated a networked 3D audio platform that enables interactive sound manipulating using IoT. We also developed an application that enables interactive manipulating on the platform using consumer goods such as smartphones and tablet devices and augmented reality (AR). These systems were exhibited at Interop 2019, and we evaluated their effectiveness by subjecting 45 people.

Keywords:

1. はじめに

環境に埋め込まれたセンサや，ユーザデバイスに搭載される多様なセンサ，ネットワークやリアルタイム分析などの，Internet of Things (IoT) を支える技術の進展によって，視聴空間の様々な要素が情報空間に取り込まれるようになってきた．それに伴い，デジタルツインとしての情報空間における処理を，リアルタイムで視聴空間に反映することで，インタラクティブな視聴空間を実現することが現実味を帯びてきた．

例えば立体音響に関しては，再生すべき複数チャンネルの音声情報をそのまま保持するチャネルベースから，よりリアルタイムレンダリングを容易にするオブジェクトベースの立体音響が登場し普及し始めている（Dolby Atmos[1] や AuroMax[2] など）．情報空間の 3 次元音響オブジェクトを操作し，リアルタイムに視聴空間に再生することで，インタラクティブな聴取が可能となる．

一方で，情報空間の情報を現実空間上に重畳して表示す

[1] 東京大学
The University of Tokyo
[2] 株式会社 竹中工務店
Takenaka Cooperation
[3] 慶應義塾大学
Keio University
[4] 株式会社アプリックス
Aplix Corporation
[5] 静岡大学
Shizuoka University
[a)] kasuya.takashi@takenaka.co.jp

© 1959 Information Processing Society of Japan

る Augumented Reality（AR）の技術も進展している．スマートフォンやタブレットで動作する AR アプリケーションを開発するため，ARKit や ARCore などの標準開発キッドが登場し，ゲームを始めとして多様なアプリケーションが人気となっている．

著者らは，こうしたインタラクティブな視聴を容易にするプラットフォームの構築を目指し，2014 年にインターネット映像音声に関する産学のコンソーシアムである Software Defined Media コンソーシアムを設立した [3], [4]．インターネットを前提とした映像音声プラットフォームの研究を推進しており，その中でオブジェクトベースの映像音声を追求している．オブジェクトベースの利点としては，1）再生側のレンダリングによって柔軟な再生環境構成が可能であること，2）リアルタイムの演算で再生する音声を作り出すため，インタラクティブなアプリケーションに適すること，がある．

本研究では，IoT を用いた立体音響のためのプラットフォームと，AR を利用したインタラクティブな音声操作と，音声の可視化を実現する立体音響アプリケーション（SDM アプリケーション）の開発・評価を行った．本稿では，2 章にて，本研究の目的を述べ，3 章で，目的に沿った本研究の提案システムの設計指針を述べる．4 章で，システムの実装について詳説する．5 章では，試作システムを Interop Tokyo 2019[*1]の SDM コンソーシアムのブースに出展した際の評価実験の結果を述べる．6 章で参考文献について述べ，7 章にて結論と今後の展望を述べる．

2. 本研究の目的

本研究の目的は，IoT による多様な入力が想定される実空間に展開された SDM アプリケーションの開発及び，それらのデータ連携のためのプラットフォームの開発・評価である．要件・開発目標として，以下を設定した．

- **柔軟なアプリケーション開発が可能なプラットフォーム**
  一般的に，映像音声の機器は，会議室や劇場，ホームシアターなど用途別にハードウェアが提供されており，目的外の利用は難しい．本研究では，音声をソフトウェアで柔軟に制御し，視聴空間を様々な目的で利用可能にすることを目指すとともに，ソフトウェアによるオブジェクトベースの立体音響を実現する．その上で，ネットワークを通じて立体音響機能にアクセスできる API を定義し，第三者クリエータが柔軟にアプリケーションを開発できるプラットフォームをを提供する．
- **立体音響システムのインタラクティブ操作**
  上記のプラットフォームに API を通じてアクセスし，立体音響システムを操作するユーザインターフェイス（UI）を開発する．仮想空間上に配置された音声オブジェクトを，操作者が事前知識なく直感的・インタラクティブに利用できる UI を目指す．また，音声オブジェクトの位置を操作する機器として，民生用のスマートフォンやタブレットを利用し，安価に実現することを目指す．開発した UI の有用性を実験評価により明らかにする．
- **立体音響の可視化**
  上記のプラットフォームに API を通じてアクセスし，立体音声の三次元位置をリアルタイムに可視化するアプリケーションを開発する．音声を直感的に可視化するため，スマートフォンやタブレットをかざすと音声の位置に AR オブジェクトを重畳するアプリケーションを実現する．開発したアプリケーションの有用性を実験評価により明らかにする．

3. システム設計

本システムの設計指針としては，以下の 2 つを置いた

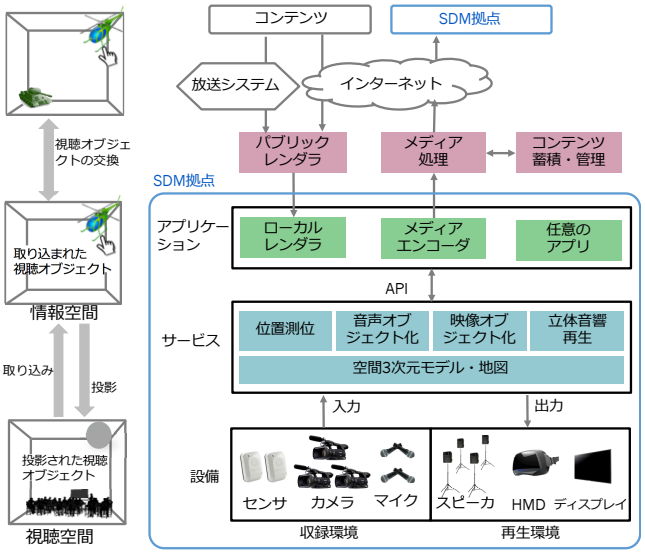

図 1　SDM アーキテクチャ

- **疎結合なシステム構成**
  ネットワーク立体視聴プラットフォームは，図 1 に示す SDM アーキテクチャ [3], [4] に従って設計される．SDM アーキテクチャは，収録・再生環境内の設備，それらのデータを収集し，モデル化・オブジェクト化するサービス群，インターネットを介した外部配信のためのレンダラ・エンコーダや，外部・内部のデータリソースをもとに任意のコンテンツ再生を行うアプリケーションから構成されている．これらは，API を介した疎結合な構成となっており，サービス群によるモデル化・オブジェクト化されたデータを利用することで，柔軟なシステム構成が可能である．

[*1] https://www.interop.jp/

© 1959 Information Processing Society of Japan

IoT による入力は，設備層に位置付けることが可能であり，サービス層に取り込まれた IoT のデータは，適切なメタデータを付与されアプリケーションから利用される．

- **オープン標準の採用**
  SDM アーキテクチャでは，通信プロトコルなどの規定は行っていないが，インターネットへの配信を前提としているために，それらに親和性のある技術仕様を導入することが望ましく，多くのベストプラクティスが発表されている，実績ある技術の採用が必要だろう．IoT に親和性のある通信プロトコルとしては，MQTT，AMQP，CoAP が良く知られている．いずれも大量のトランザクションを想定した高いスケーラビリティが特徴である．本研究では，柔軟かつ利用が容易な MQTT を採用することとした．MQTT は，MQTT Broker をハブとした購買・購読（Pub-Sub）型の通信を特徴としたプロトコルであり，Microsoft Azure や AWS での IoT を想定した PaaS などで幅広く用いられているため，サンプルソースの入手も容易である．なお，筆者らは建物設備に MQTT を適用し，リアルタイムな設備制御においても十分な性能を持つことを検証している [5]．

4. システム実装

システムの構成を図 2 に示す．図の下部は LAN に接続された音響設備・アプリケーションであり，上部はインターネット上に設置されたサービスを示す．本システムでは，アプリケーション間の通信のための通信バスとして MQTT を採用し，クラウド上に MQTT Broker とデータ前処理等を行うサービスを配置し，ローカル側に立体音響再生のためのサービスを配置することでプラットフォーム（立体音響プラットフォーム）を構成している．

試作システムでは，AR マーカによるインタラクティブな音声オブジェクト操作アプリケーション，リモコン UI による音声可視化アプリケーションの 2 つがプラットフォーム上に配置されており，これらを組み合わせることで，オブジェクトベースの立体音響を実現している．

本章では，それぞれのサービス，アプリケーションについて述べる．

4.1 インタラクティブ操作アプリケーション

複数の AR マーカの位置情報を，iPhone を使って推定するアプリケーションである．Aplix 社が提供している Quanti ™ の拡張版を用いており，基準点として設置した AR マーカからの位置と方向を推定することができる（図 3）．推定されたそれらの情報は，AR マーカの検知 ID を含む形で JSON にエンコードされ，MQTT でリアルタイムに発出される．以下は MQTT のペイロードサンプルで

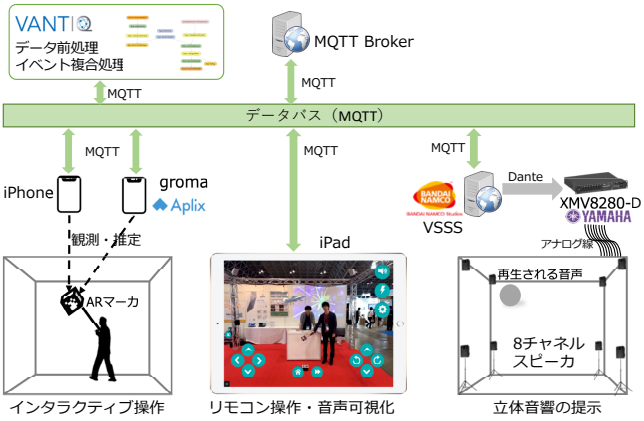

図 2　立体音響プラットフォームのシステム構成

ある．検出したデバイス（device）と，検知した AR マーカの ID(tagID)，姿勢情報（Rx,Ry,Rz），位置情報（t）が発出される．

```
{
    "sequence":45,
    "timestamp":"2019/04/19 10:04:46.3900",
    "device":"iPhone1",
    "tagId":1,
    "withOrigin":true,
    "Rx":{"x":-0.0538,"y":0.0102,"z":-0.9985},
    "Ry":{"x":0.9936,"y":0.0997,"z":-0.0525},
    "Rz":{"x":0.0991,"y":-0.9950,"z":-0.0155},
    "t":{"x":-0.1341,"y":0.1544,"z":0.2120}
}
```

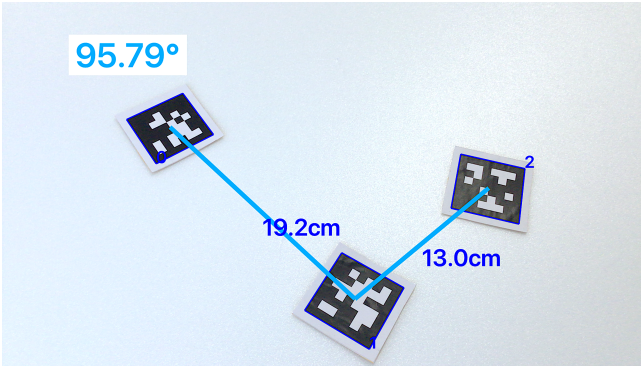

図 3　Quanti による AR マーカの検出

今回実証した環境では，ユーザの動きによって iPhone の視覚が遮られる場合に備えて，およそ 2.5 メートルの高さに，iPhone を 2 箇所設置した．なお，iPhone は有線 LAN に接続し常時給電されている．図 4 は AR マーカを用いた操作の例である．AR マーカを張り付けた指示棒を使って，音声の中心位置を操作している．

後述する Virtual SoundScape System(VSSS) による音声提示が可能なソース同時に 1 つまであるため，複数台の Quanti を用いて立体音響制御を試みた場合，それぞれに推測された位置情報が異なったり，AR マーカを Quanti の

© 1959 Information Processing Society of Japan



図 4　AR マーカによる操作（音声可視化アプリ）

フレームレート 20fps よりも高速で動かしたりした場合，再生位置が急に移動したり，ぶれて聞こえたりする懸念があると考えた．そのため，プラットフォーム側の機能として，カルマンフィルタによる位置推定を実装した．

4.2　立体視聴プラットフォーム

プラットフォームの機能としては，以下を実装した．

(1) **データ（メッセージ）バス**
IoT デバイスやアプリケーション間でのメッセージ交換する機能．

(2) **データ前処理・イベント複合処理**
特定のメッセージに対して，ルールベース／機械学習による異常値検出や後述するカルマンフィルタによる位置情報の更新などの前処理を行う．

(3) **データ保存**
アプリケーションの動作に必要なデータをプラットフォーム上に保持する機能．永続化が必要なデータについては，別途データソースを用意する．

(4) **データ変換**
立体音響の提示のためにデータ変換を行い，MQTT でメッセージを発行する機能．

(5) **立体音響の再生**
VSSS を使って，スピーカーシステムから立体音響を再生する機能．

本システムでのメッセージ交換は，以下の流れとなる．Quanti から取得した複数の位置情報は，MQTT で発出された後，プラットフォームで前処理が施される．異常値検出や検知対象の位置情報の推定が行われた後，必要なデータ変換を施されて立体音響の再生を行うスピーカシステムである VSSS に操作コマンドとして入力される．具体的には，データ変換時の処理として，前処理された位置座標は VSSS が解釈可能な値の幅（0〜255）に変換され，コマンドの一部として入力されている．この際，再生対象の音源選択のコマンドは，リモコン操作部からの入力を，プラットフォーム側が保持し，必要に応じて再生側に伝えることで実現される．これらの操作コマンドは，VSSS の入力インタフェースとして提供されていた MIDI による API を MQTT でラップしたものとなっている．なお，インターネットに設置した MQTT Broker のサーバスペックは表 1 である．

表 1　MQTT Broker のサーバスペック

OS	Ubuntu 16.04.6 LTS
CPU	Intel(R) Xeon(R) E5530 @ 2.40GHz
メモリ	8 GB
MQTT Broker	VerneMQ

MQTT トピックの命名規則としては，表 2 に示す固定の 11 階層の構造を採用した．これらは，建物設備制御における命名規則 [5] を踏襲しており，建物の空間内に配置された設備機器の情報を十分に記述できることに加え，BIM(Building Information Modeling) との相性も良い．例えば，3 次元空間の特定の位置に特定の音を再生する場合，以下のような TOPIC 名でコマンドを発行する．

```
3dbcs.biz/UTokyo/iREF/6F/Hilobby/SDM/midi/sc/
VSSS01/controlChange/W
```

表 2　MQTT トピック命名規則

属性	階層	説明
Who	1	サービス事業者名
Where	2	敷地名・サイト名
	3	棟・建物名
	4	階数
	5	分割エリア・フロア名・教室名
What	6	サービスカテゴリ (SDM や空調, 照明など)
	7	種別 (立体音響や位置測位など)
	8	型式・機器メーカ
	9	トピック内で一意の識別名称
	10	パラメータ名 (音源操作，温度，湿度など)
入出力	11	(R または W)

4.2.1　データ前処理

データ前処理・保存・変換の一部は，リアルタイムイベント処理基盤である VANTIQ を用いて実装している．機能モジュールを組み合わせることで容易にシステム開発・デプロイが可能であり，かつリアルタイム性・信頼性の高い商用システムであるが，同様の機能は，OSS である NodeRED[*2] などでも実現できる．図 5 に VANTIQ で開発した前処理のロジック一部を示す．Source と記載のあるノードが MQTT からの入出力を示しており，App，Rule と記載あるノード

[*2] https://nodered.org/

© 1959 Information Processing Society of Japan

で詳細なロジックの記述を行っている．処理の概要としては，実証環境やシミュレータから生成した，位置情報データに対しては前処理を行った上で，カルマンフィルタによる位置情報の推定器（Estimator）に送るために，MQTT の通信バスに発出している．Estimator からの入力に対しても前処理を行い（App:Preprocess_From_Estimator），SDM 用のデータ変換（Rule:format_TagInfo_For_SDM）を行うことで，立体音響の再生が行われる．なお，それぞれのノードで扱うデータに対しては，Type ノードによってスキーマ定義がされる．

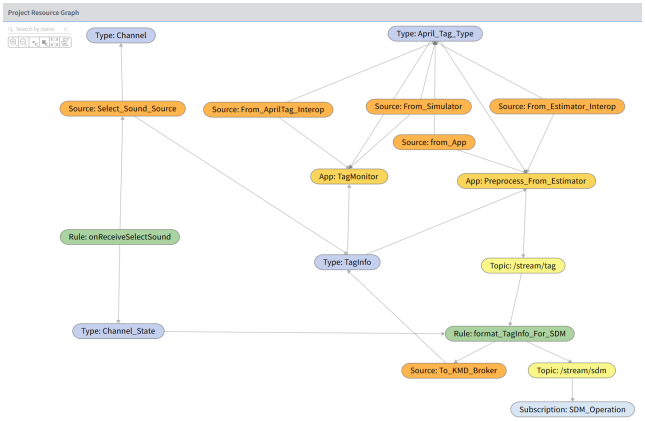

図 5　VANTIQ によるロジックの記述

カルマンフィルタによる位置推定機能は，Python によって実装され，MQTT を介して VANTIQ とメッセージ交換している．Python となった理由としては，VANTIQ や NodeRED のようなビジュアルプログラミングツールでは，行列計算などがサポートされていないためである．実測値である 3 次元空間上の位置座標（x,y,z）をフィルタリングによって推定した結果を，図 6 に示す．カルマンフィルタによって，滑らかに位置座標が推移しているのが分かる．

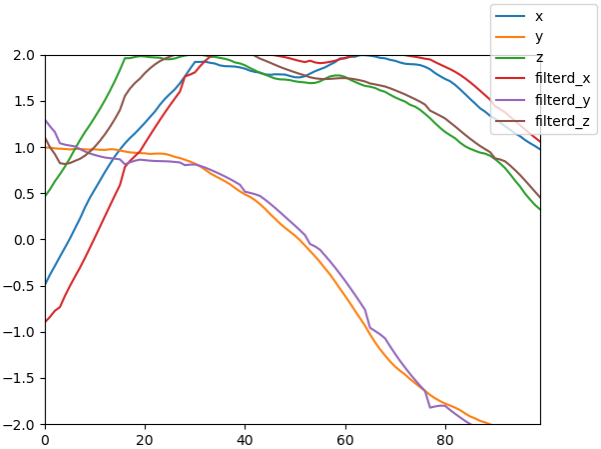

図 6　予備実験カルマンフィルタ

4.2.2　立体音響の再生

データ変換後のメッセージを解釈・再生するのは，図 2 右下に示すバンダイナムコスタジオの開発する VSSS である．VSSS はあらかじめ登録された複数の音源を，アプリケーションから指定された三次元位置に提示することができる．VSSS で計算された各スピーカの音声情報は，Dante^{TM} 規格でヤマハ XMV8280-D へ送信される．XMV8280-D では，各スピーカに接続されるアナログケーブルを通じて音声情報が伝えられる．こうして，4m 四方の角に設置された 8 つのスピーカ（高さ 1.2m と 2.7m）を用いてユーザに立体音響を届けることができる．

4.3　リモコン操作・音声可視化アプリケーション

4.1 節に示したインタラクティブ操作アプリケーションとは別に，リモコン操作で音声オブジェクトの位置変更をするための iPad アプリケーションとして開発した（図 7）．一般的なドローン操作に用いられるようなユーザインターフェースを提供しており，画面左側に上昇・下降・右に移動・左に移動の 4 つのボタンを配置し，画面右側には前進・後退・右旋回・左旋回のボタンを配置した．ユーザの操作に応じて対応する MQTT メッセージが発行されるとともに，プラットフォーム側で処理された位置情報をもとに，AR オブジェクト（画面上では UFO）が表示さる．アプリによる仮想空間と，立体音響の再生される実空間の座標のキャリブレーションは，感覚的な要素も考慮して，環境ごとに手動で設定することとした．なお，開発環境は Unity である．



図 7　リモコン操作・音声可視化アプリの画面

5.　評価実験

本システムのデモンストレーションを Interop2019 で行い（図 8），同環境下でのネットワーク試験による性能評価と，45 人のアンケートによる主観評価を行った．

© 1959 Information Processing Society of Japan



図 8　Interop2019 でのデモンストレーション

5.1　ネットワーク性能計測

ネットワークによる遅延が人間の感覚にどう影響するのかを検証するために，システムの LAN 上に監視 PC を用意し，クラウド上の MQTT Broker に対する Ping による RTT(Round-Trip Time) 計測を行った．結果のヒストグラムを図 9 に示す．ヒストグラムの縦軸は対数表示となっており，横軸が計測時間である．最大で 4 秒近い遅延も見られたが，平均としては 25 ミリ秒程度となった．また，パケット・ロスが 1%程度バースト的に見受けられた．これらの遅延やパケット・ロスは，会場のネットワーク回線の問題であると考えられる．

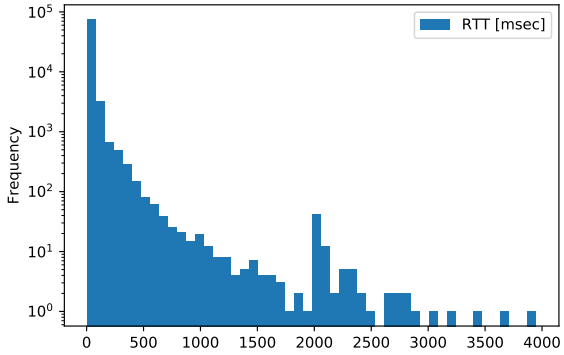

図 9　RTT 計測結果のヒストグラム

5.2　アンケート

表 10 にアンケート項目とそれらの結果をリッカー尺度（1：低評価、7：高評価）で整理した結果を示す．全体的に高評価が多いが，映像と音声のずれ，コントローラによる操作性に関しては低評価が多くみられる結果となった．図 11 は，音声可視化アプリによる AR 映像と再生された立体音響の位置に関する設問の結果である．表示・再生位置が合っているという回答が一番多いが，平均的には再生位置が遠いと感じる傾向にある．

表 3 は，アンケート内の自由記述欄のコメントである．コンテンツの面白さを評価する声がある一方，アンケート結果と同様に音の遅延や操作の難しさへの指摘がみられる．また，エリアの狭さを指摘する声もあり，大空間での立体音響制御コンテンツへの期待が感じられる．

表 3　自由記述欄のコメント

ライブビューイングをより楽しめるものにできそうだと感じました
音声と AR 映像の音像と位置がシンクロしていない
楽しかったです
AR が動くことによって音像移動のトリガーできるのは 面白いアイデアです．他にないと思います．頑張ってください．
音の遅延対策には限界があるので映像を音に合わせて 遅延させたら良いのではないのでしょうか？
全ての存在が衝撃的でした．
180 度回ると左右が逆になってしまうため操作が難しい．
回転すると方向が違う
音の移動を感じるエリアが狭い
エリアを広くなれば

5.3　考察

5.3.1　ネットワーク性能計測

低評価が目立った音声可視化アプリでの音声と映像の不一致の原因としては，バースト的な遅延やパケット・ロスによって，表示対象のオブジェクト位置を一時的に見失うことが一因であると考えられる．それにより操作が直感的でなくなるなど，ユーザーエクスペリエンス低下が発生している可能性があり，こうした遅延やパケット・ロスのハンドリングが本システムの技術的な課題といえる．パケット・ロスの防止には，MQTT の QoS を 1 以上にすると解決可能であるが，その場合スループットが大きく低下する [5] ことも確認されており，ローカル（エッジ）とクラウドでのサービス・機能の配置の見直しや，アプリケーション側での機能付加の必要があると考える．また，音声の動きと操作の感覚がマッチしておらず，操作が難しいと言う意見が見受けられたが，ネットワーク上の平均的な遅延は十分に小さいといえるため，プラットフォームの前処理部で行われるフィルタリング性能などの問題と考えられる．

5.3.2　アンケート

AR マーカによる音声追従については，概ね期待に沿った体験が提供できているといえる．しかしながら，AR マーカに対して遅れを感じる，仮想空間上の位置に比べて遠くに聞こえるという意見も多い．これらは，仮想空間と実空間のキャリブレーションがうまくいっていないことを示唆している．一方で，ネットワークやフィルタリングの性能が今回のデモンストレーションに適合してなかったとも考えられ，環境ごとに更なる検証が必要といえる．

© 1959 Information Processing Society of Japan

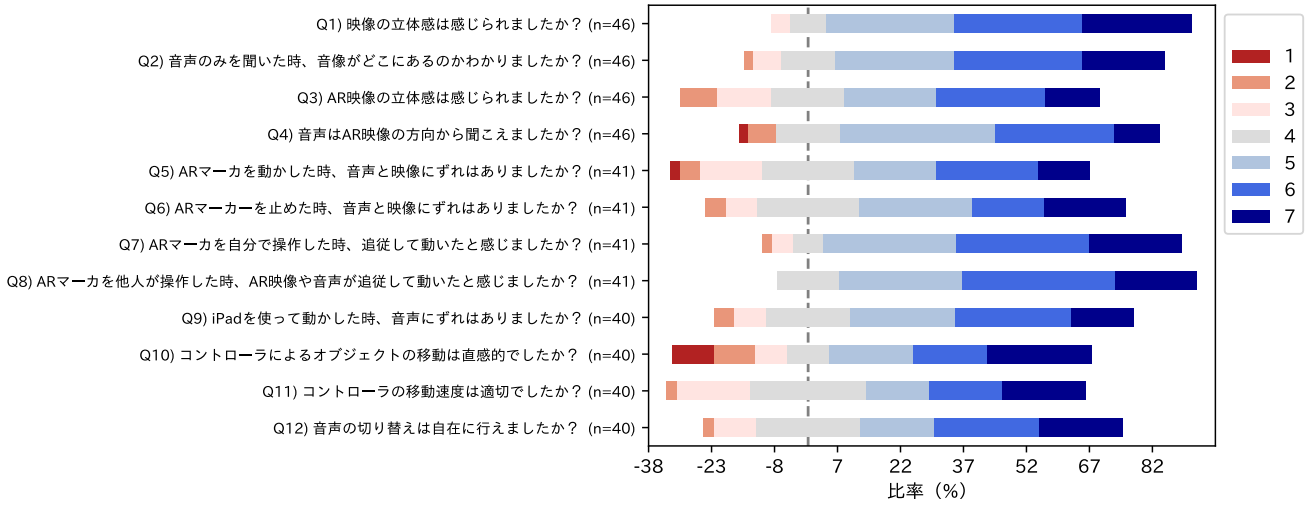

図 10 アンケート結果

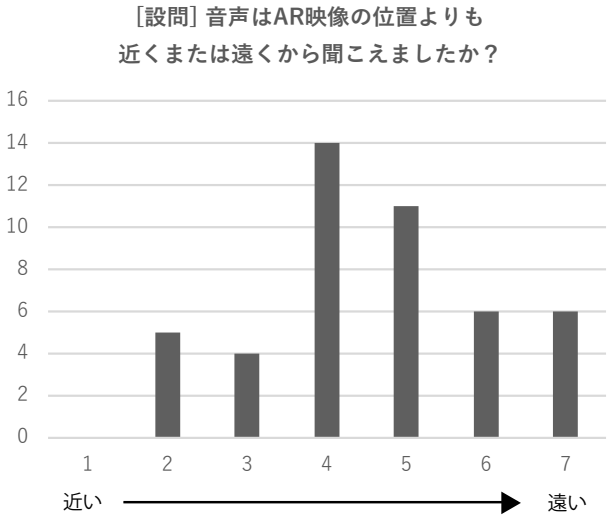

図 11 AR 映像と音声再生位置の関係性評価

6. 関連研究

SDM アプリケーション制作基盤技術として，我々は汎用的なシステム基盤である SDM アーキテクチャ [3]，SDM 用のオントロジである SDM オントロジ [6] の提案を行うとともに，それらの技術を利用して，アプリケーション開発・評価を行ってきた．

SDM360^2[7] は，仮想の立体空間上に配置された複数の音源をタブレットで視聴できるアプリケーションであり，仮想空間上に位置に応じて複数の音源を合成した立体音響を再生することが可能で，個別の音源の音量などを変えることで，特定の音源だけを聴いたり，抜いて聴いたりすることができる．アンケートによる主観評価によると，仮想空間上に配置された音声オブジェクトの操作により，90 %以上の被験者が特定の音のみを聞くといった体験の有用性や，音声の立体感が感じられるという結果を得た．

LiVRation [8], [9] は，SDM360^2 を VR デバイスで再生できるようにしたものので，より臨場感を高めるために，SNS 連動や振動デバイスの利用などの機能を付加した．なお，それぞれのアプリケーションは，SDM オントロジ [6], [10] によって，音声・映像オブジェクトやイベント等の情報が記述されている．

上記のアプリケーション評価によって，仮想空間とパーソナルデバイスを連動させたアプリケーションの有効性が示唆された．一方で，実空間における SDM コンテンツの体験についても様々な評価を行ってきた．小川らは，IoT デバイス（Ubisense）を利用して，音源の位置をリアルタイムに変化させた際の体験の評価を行っている [11], [12]．これらの実証においては，IoT デバイスによる位置情報と，仮想空間であるデジタルツイン上の SDM オブジェクトの関係性は 1 対 1 の関係性であった．例えば，展示会のような場所において，複数人での操作するアプリケーションを想定すると，様々なデバイスによる入力が想定されるが，共有する仮想空間，物理空間における操作対象は 1 つである．本研究では，このような多対 1 の操作環境を想定したアプリケーション構築手法についての研究ともいえる．

7. まとめ

本研究では，インタラクティブな音声視聴を可能にする立体視聴プラットフォームを開発するとともに，複数の AR マーカによって再生する音声オブジェクトの操作・可視化のためのアプリケーションを開発し，ネットワーク試験とアンケートによる評価を行った．これらのシステム設計においては，SDM アーキテクチャに基づく疎結合な構成とし，オープン仕様の技術・プロダクトを組み合わせること を指針とした．試作したシステム評価では，仮想空間で再生された音声の方向や追従性については，ある程度直感的であるという結果が得られたものの，実空間と仮想空

© 1959 Information Processing Society of Japan

間のキャリブレーションや操作感，UI については改善の余地が大きいといえる．一方で，IoT デバイスによる実空間での音声位置制御によるコンテンツについては，好意的な意見が多く聞かれており，ユーザエクスペリエンスの向上やコンテンツの充実が期待されているといえる．

今後の展望としては，これらのシステムを運用する上での仮想空間と実空間とのキャリブレーションの自動化や，位置情報の追従に用いるフィルタリングの性能向上と評価，BIM との連携，SDM オントロジの適用によるプラットフォームの機能拡張を行うとともに，プラットフォームを利用したアプリケーション，コンテンツの拡充を図っていきたい．

参考文献

[1] Dolby Atmos© Specifications. Technical Report Issue 3, Dolby Laboratories, 2015.
[2] AUROMAX© Next generation Immersive Sound system. November 2015.
[3] 塚田学, 小川景子, 池田雅弘, 曽根卓朗, 丹羽健太, 齊藤翔一郎, 粕谷貴司, 砂原秀樹, 江崎浩. Software Defined Media: 視聴空間サービスのソフトウェア制御. 日本ソフトウェア科学会学会誌『コンピュータソフトウェア』「ネットワーク技術」特集, September 2017.
[4] Manabu Tsukada, Keiko Ogawa, Masahiro Ikeda, Takuro Sone, Kenta Niwa, Shoichiro Saito, Takashi Kasuya, Hideki Sunahara, and Hiroshi Esaki. Software Defined Media: Virtualization of Audio-Visual Services. *IEEE International Conference on Communications (ICC2017)*, May 2017. Paris, France.
[5] 粕谷貴司, 近藤正芳, 茂手木直也, 松岡康友, 矢野雅, 秋山貴紀, 境野哲, 貞田洋明, 堀越崇, 畠山英之. スマートシティのための MQTT プラットフォームの検証. 電子情報通信学会技術研究報告. ASN, 知的環境とセンサネットワーク, Vol. 114, No. 65, pp. 45–46, may 2014.
[6] 菰原裕, 塚田学, 江崎浩, 曽根卓朗, 池田雅弘, 高坂茂樹, 新麗, 新善文. SDM Ontology: Software Defined Media のメタデータ管理のための Ontology. マルチメディア，分散，協調とモバイル (DICOMO2017) シンポジウム, June 2017.
[7] 塚田学, 菰原裕, 新居英明, 粕谷貴司, 高坂茂樹, 小川景子, 江崎浩. SDM360^2: インタラクティブ 3D コンテンツの自由視聴点再生. 情処論文誌：デジタルコンテンツ (DCON) トランザクション, Vol. 6, No. 2, pp. 10–23, 2018.
[8] 粕谷貴司, 塚田学, 菰原裕, 高坂茂樹, 水野拓宏, 野村譲誉, 上田江崎 浩. インタラクティブな遠隔ライブ vr 配信プラットフォーム. 情処論文誌：デジタルコンテンツ (DCON) トランザクション, Vol. 7, No. 2, 2019.
[9] Takashi Kasuya, Manabu Tsukada, Yu Komohara, Shigeki Takasaka, Takuhiro Mizuno, Yoshitaka Nomura, Yuta Ueda, and Hiroshi Esaki. Livration: Remote vr live platform with interactive 3d audio-visual service. In *IEEE Games Entertainment Media Conference (IEEE GEM) 2019*, Yale University, New Haven, CT, U.S., 2019.
[10] Ray Atarashi, Takuro Sone, Yu Komohara, Manabu Tsukada, Takashi Kasuya, Hiraku Okumura, Masahiro Ikeda, and Hiroshi Esaki. The software defined media ontology for music events. In *Workshop on Semantic Applications for Audio and Music (SAAM) held in conjunction with ISWC 2018*, Monterey, California, USA., 2018.
[11] 小川景子, 塚田学, 江崎浩, 砂原秀樹. Tangible Sound Object: オブジェクトベースの音響システムのためのタンジブルインターフェース. マルチメディア，分散，協調とモバイル（DICOMO2016）シンポジウム, 7 月 2016.
[12] Keiko Ogawa. Tangible sound : a tangible interface for object-based sound systems. Master's thesis, KMD:Graduate School of Media Design, Keio University, March 2016.

© 1959 Information Processing Society of Japan