

推薦研究論文

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

粕谷 貴司^{1,2,a)} 塚田 学¹ 菰原 裕¹ 高坂 茂樹³ 水野 拓宏⁴ 野村 譲誉⁴ 上田 雄太⁵ 江崎 浩¹

受付日 2019年4月23日, 採録日 2019年5月28日

概要: インターネットを前提とした視聴サービスが登場し、中でも空間に存在する視聴対象を解釈し、コンテンツとして活用するオブジェクトベースの視聴サービスの重要性が増している。2014年より、Software Defined Media (SDM) コンソーシアムでは、オブジェクトベースのメディアとインターネットを前提とした視聴空間の研究を行っている。近年、4K や 360 度動画による高品質な動画配信サービスが普及しているが、自由視点で視聴可能なコンテンツの配信手法については一般化していない。本研究では、音楽ライブのイベントを収録するとともに、イベント情報のメタデータ定義を行い、HMD を用いてインタラクティブに自由視聴点での 3 次元映像音声を再生するアプリケーション「LiVRation」を設計、実装し、評価を行った。さらにビルボードジャパンが開催した「Billboard LIVE MUSIC HACKASONG 2017」にてデモンストレーションを行い、審査員と一般の来場者の投票により最優秀賞および会場賞を受賞した。

キーワード: 映像音声メディア, 3D コンテンツ, Media Networking, Software Defined Media, VR

An Interactive Remote VR Delivery Platform for Live Music Event

TAKASHI KASUYA^{1,2,a)} MANABU TSUKADA¹ YU KOMOHARA¹ SHIGEKI TAKASAKA³
TAKUHIRO MIZUNO⁴ YOSHITAKA NOMURA⁴ YUTA UEDA⁵ HIROSHI ESAKI¹

Received: April 23, 2019, Accepted: May 28, 2019

Abstract: Various audio-visual service based on Internet are deployed these days widely. Among these, object-based audio-visual services are getting more critical. We started Software Defined Media (SDM) consortium to investigate object-based audio-visual services and Internet-based audio-visual since 2014. The placement of microphone and camera limits the audience to watch at the free viewpoint of the contents of the package media such as DVD. In the study, we designed and implemented the system of interactive 3D audio-visual service with a free-view-listen point, named LiVRation. 211 persons experienced LiVRation and answered the questionnaire in subjective evaluation. We also demonstrated the system in “Billboard LIVE MUSIC HACKASONG 2017” hosted by Billboard Japan. We received the first prize based on the vote of the judges and the audience.

Keywords: audio-visual media, 3D contents, Media Networking, Software Defined Media, VR

1. はじめに

近年、Youtube やニコニコ動画などの動画配信サービスや HMD (Head Mounted Display) のような VR デバイスの発展により、4K 映像や 360 度動画なども容易に再生できるようになってきた。5G のような大容量の通信技術や、MPEG4-ALS [1] などの音声のロスレス配信技術も一般化

本論文の内容は 2018 年 7 月の dicom2018 シンポジウム報告され、DCC 研究会主査により DCON への掲載が推薦された論文である。

¹ 東京大学
The University of Tokyo, Bunkyo, Tokyo 113-8656, Japan
² 株式会社竹中工務店
Takenaka Corporation, Koto, Tokyo 136-0075, Japan
³ エスイーディー株式会社
Sophisticated Engineers Department (SED), Minato, Tokyo 108-0075, Japan
⁴ 株式会社アルファコード
Alpha Code Inc., Bunkyo, Tokyo 113-0034, Japan
⁵ 株式会社 CRI・ミドルウェア
CRI Middleware Co., Ltd., Shibuya, Tokyo 150-0002, Japan
a) kasuya@hongo.wide.ad.jp

してきており、今後より高品質でリッチなストリーミングメディアが普及していくと考えられる。一方で、コンサートやライブの需要や人気が増大しているにもかかわらず、それらを記録したBlu-rayなどのパッケージメディアは、収録機器の設置位置に制約を受けるため、視聴者の意思による自由な角度、距離による視聴は困難である。

一方、インターネットを前提とした視聴サービスが登場し、中でも空間に存在する視聴対象を3次元的に解釈するオブジェクトベースの視聴サービスの重要性が増している。そこで著者らは2014年からSoftware Defined Media (SDM) コンソーシアムを設立し、オブジェクトベースのデジタルメディアと、インターネットを前提とした視聴空間の研究を続けてきた[2], [3]。SDMとは、映像・音響システムのIPネットワーク化を背景に、これらの設備の機能に対して抽象化・仮想化を行い、サービスとしての映像・音響を提供するための基盤的なアプローチである。

一般家庭においても、インターネットからの配信されるVRコンテンツの視聴が可能になってきたが、配置されている音源は静的なものがほとんどで、高品質なストリーミング再生は困難であった。こうした課題解決のため、我々はVR技術とロスレス配信技術、SDMオントロジ[4]を使って、自由視点でのライブ体験を実現する「LiVRation」を試作・検証した。

本論文ではまず、2章で関連研究について述べ、3章で本研究の目的を述べる。4章でSDMによるアプリケーション(SDMアプリケーション)のデータ構造・意味表現であるSDMオントロジについて述べる。5章でシステムの設計、実装、コンテンツ収録についての述べ、6章でそれらの評価と各所で実施したデモンストレーションの報告を行う。7章で本論文の結論と今後の課題について述べる。

2. 関連研究

著者らの先行研究[5], [6]は、LiVRationと同様に仮想空間内での視聴位置に応じた音声ミックスを行う、タブレット端末での視聴を前提としたアプリケーションである。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。一方で映像の立体感やインタラクティブ性にかかわる設問については、比較的低い結果が出ていた。LiVRationではVR技術を導入することで、インタラクティブ性の改善を図るとともに、コンテンツの配信機能とメタデータ記述を付加することで、インターネット配信時の親和性を向上し、コンテンツ配信のためのプラットフォーム化を目指した。

音響の録音・再生システムは、チャンネルベース、オブジェクトベース、シーンベースの3つに大別されることがある[7]。チャンネルベースのシステムは、ステレオサウンド

(2チャンネル)から始まりサラウンドサウンド(多チャンネル)へと発展し、2016年に試験放送の始まったスーパーハイビジョン[8]では、22.2マルチチャンネルの立体音響システム[9]を採用している。チャンネルベースのシステムでは、収録においては一般的なマイクを利用できる利点があるが、最終的に出力する音声の情報をそのまま記録するため、再生環境に合わせたチャンネル数の音声情報を記録しておく必要がある。また、最終出力の形で音声データを記録するため、視聴者の動きに追従した音声の提示することは難しい。

オブジェクトベースのシステムは、音源の音色のデータとその3次元の位置をメタデータとして記録し、再生環境においてスピーカの位置から音場をレンダリングする方式である。たとえば、映画館やホームシアタでの採用が進むDolby Atmos[10]や、AuroMax[11]などがある。また、オブジェクトベースの方式は、国際標準化機構(ISO)と国際電気標準会議(IEC)のMoving Picture Experts Group(MPEG)において、MPEG-H[12], [13]の標準化が進んでいる。オブジェクトベースの方式では、音源の位置を記録する必要があるが、収録に使うマイクは一般的なものを利用できる利点がある。また、再生する音源と視聴者の相対的な位置関係から音場を計算できるため、視聴者の位置移動や頭部の回転に追従した音声の提示が可能である。

シーンベースのシステムは、ある受音点に到来する音を指向性を持った複数のマイクを組み合わせて、全周360度で空間の音全体を録音し、到来する音の方向を再現する技術である。アンビソニックス(Ambisonics)[14]の収音では、アンビソニックマイクという特殊なマイクを利用し、収音したデータはB-フォーマットと呼ばれる信号として記録される。このデータをもとに視聴者の聴取位置における、頭部の回転に追従した音声の提示が可能である。ただし、視聴者の位置移動に追従した音声の提示は難しい。Ricoh Theta Vなど近年発売された民生用収録機器にもアンビソニックマイクが搭載される例も多く、こうして収録された収録データはYouTubeやFacebookの動画共有サイトでも再生に対応している。さらに、アンビソニックでは再現が難しい複数の音源から到来する音を正確に再現する高次アンビソニックス(Higher-order Ambisonics, HOA)[15]の研究も行われている。

映像音声の遠隔配信はIPネットワークの高速化にともない、4K60p映像を複数同時に配信する実証実験が開始されている。高精度な映像音声の双方向での遠隔配信を行うことで、遠隔コラボレーションシステムを構築すると、立体感や情感など、臨場感を高めることができる[16]。さらに、同様の技術を利用してデジタルシネマ劇場へのライブ配信することで、劇場をパブリックビューイングの会場として転用することが可能になる。これにより、同じく高精度化するホームシアタから劇場を差別化し、劇場施設の提供できる価値を大きく向上させると考えられ、ビジネス

的な展開が期待されており、商用実証実験が行われた [17].

遠隔のユーザ同士が快適に会話し、効率的に協調作業するためのコミュニケーションシステムの開発が進んでいる。NTTでは、同じ部屋にいる感覚を同室感と名付け、同室感コミュニケーションシステム「t-Room」を開発した [18], [19]. t-roomでは、ユーザ全員が周囲の音や映像に関して同じ認識や知覚を対称的に共有することを目指し、同じ大きさの部屋に複数の背面スクリーンを囲い込んで設置している。

バーチャルリアリティの視覚ディスプレイとしてはCAVE [20] や多面型全天周ディスプレイ (CABIN) [21] を始めとする没入型多面ディスプレイの研究が行われて来た。こうした4面の壁と地面を含めた没入多面ディスプレイはHMDとは違い、その場にいる多人数のユーザに同時に仮想世界の体験を提供できる。したがって、こうしたディスプレイに追従する音響の提供はヘッドフォンではなく、複数のスピーカによるインタラクティブ高臨場感音場提示手法が検討されてきた [22]。また、NHK放送技術研究所は、2眼立体の3次元コンピュータグラフィックス再生と、映像に追従してインタラクティブに3次元の音場をスピーカアレイを用いて再生するシステム [23] を組み合わせてインタラクティブ3D映像音響再生システムを開発した [24]。

インターネット上で構造化されたデータを公開する手法としては、RDF (Resource Description Framework) が推奨されている。RDFは、データ (リソース) の関係を主語、述語、目的語という3つの要素 (トリプル) で表現し、それらを連結させていくことで意味表現を拡充させていく。RDFによって記述されたリソースはIRI (Internationalized Resource Identifier) によって参照可能であり、それらの記述・語彙のルールであるオントロジを利用することで、コンピュータによる自動処理に適した形式となる。このRDFが外部と連携し、相互リンク可能になったものはLOD (Linked Open Data) と呼ばれ、一般的にはインターネット上に配置されたSPARQL Endpoint と呼ばれるサーバに公開する。SPARQL Endpoint はSPARQLクエリを処理して、RDFなどでデータを返すサービスであり、Virtuoso^{*1}やGraphDB^{*2}など、OSSの実装も多く存在する。

RDFやLODは、現在たとえば、人文社会系大規模データベース [25] や、ノックアウトマウスの表現型のデータベース [26] に使われ、データの横断的な利用を促進している。さらに、データ間の関係を示す語彙やデータの種類 (クラス) を表す語彙はRDF Vocabulary と呼び、音楽データを記述するRDF Vocabulary はMusic ontology [27] として定義されて、英国放送協会 (BBC) などで広く利用されている。

*1 <https://virtuoso.openlinksw.com/>

*2 <https://www.ontotext.com/products/graphdb/>

以上、立体音響、映像伝送、VR、オントロジの研究を概観したが、LODによってインターネットからの映像・音響データのメタデータ参照を可能とし、かつ立体音響によるVRコンテンツ配信のプラットフォームを目指した研究はこれまでなかったといえる。

3. 本研究の目的

本研究の目的は、音楽イベントの遠隔配信を対象とし、自由視点映像音声のインタラクティブ再生を行うアプリケーション・プラットフォームの構築である。具体的には、収録したライブを自由視点で視聴するとともに、収録された音声を自由にコントロールし、かつ演奏者や楽器のメタデータ、ソーシャルメディアなどで発信されるコンテンツについての情報も動的に扱うことができるSDMアプリケーションである。そのために、我々はLiVRation [28] を試作し評価を行った。システム要件として以下を想定した。

3次元の映像・音声の演出をソフトウェアで制御：視聴オブジェクトを3次元表現を持った情報空間上で管理しながら、ソフトウェアの演出によって再生環境に適した、またはユーザがカスタマイズした映像と音声をソフトウェアレンダリングによって作り出すことができる。

自由な視聴体験：利用者が視聴位置を自身で決めることができる。位置に基づいて、収録音声リアルタイムで自動合成され、ヘッドフォンなどで視聴することができる。

遠隔配信：ライブをリアルタイム配信することが可能であり、再生環境を整えれば、ネットワークを介してどこでも視聴することができる。収録済みの音源に対しても、同様に配信することができる。

高臨場感・没入感：4Kやロスレスなどの高音質な映像・音声を扱うことができる。より臨場感の高いライブ体験をするために、VRや振動伝達 (ハプティクス) を利用する。

インタラクティブな体験：コントローラを使って特定の音を強調したり、不要な音を消したりすることができる。ソーシャルメディアと連携して、コメントなどを共有することができる。

上記を実現するため、我々は収録した音源をオブジェクトオーディオ化 (SDMオブジェクト化) し、多拠点映像とともに配信する仕組みを構築するとともに、SDMオントロジを使って、それぞれのSDMオブジェクトの情報を定義した。それらを受信し、VRデバイスで再生するLiVRationの詳細について、以下で述べる。

4. SDMオントロジ

SDMコンソーシアムでは、データを記録・再現するためのシステム構築だけでなく、実際にライブやコンサート

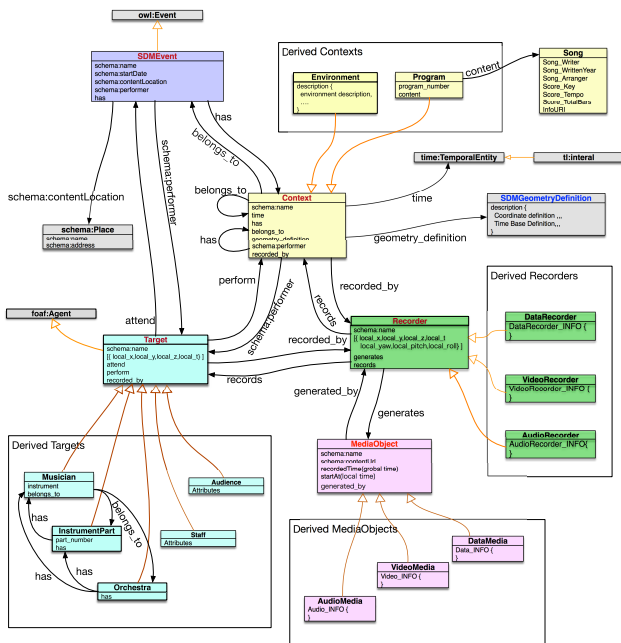


図 1 SDM Ontology のデザイン
Fig. 1 Design of SDM Ontology.

のデータを記録し、活用するためのアプリケーション開発も行っている [5]。記録されたデータには対象の映像や音だけでなく、位置情報や楽器の向き、演奏された曲目や会場情報、録音プロセスといった情報も記録される。それらのデータは、様々なアプリケーションから参照、活用されることが望ましく、そのため構造化して相互にも、インターネットからも連携可能とすることが望ましい。

我々は SDM コンソーシアムが保有・管理しているデータを LOD に変換するために、SDM 用の RDF Vocabulary である「SDM オントロジ」を定義した [4], [29]。SDM オントロジは、イベント全体の情報である SDMEvent、収録対象が置かれた状況・環境に関する情報（イベント内のプログラムの名前や内容など）である Context、収録対象の情報（対象の位置情報や種類など）である Target、収録機器情報（機器の位置情報や種類など）である Recorder、生成されるメディア情報である MediaObject の 5 要素（クラス）によって大きく構成される（図 1）。イベントの総体である SDMEvent の下に Context, Target, Recorder が存在し、それらは相互参照しあう関係になっている。そして、収録行為によって生成された生成物として MediaObject が存在する。なお、データを公開する人が各々の語彙を勝手に定義するとデータの共有が難しくなるため、RDF では可能な限り既存の語彙を使用することが推奨されている。そのため、それぞれのクラス内の語彙には、`schema.org` *3 で定義された語彙を取り入れている。

SDM アプリケーションでは、SDM オントロジで定義された収録対象の RDF が保存された LOD クラウドに

*3 <http://schema.org/>

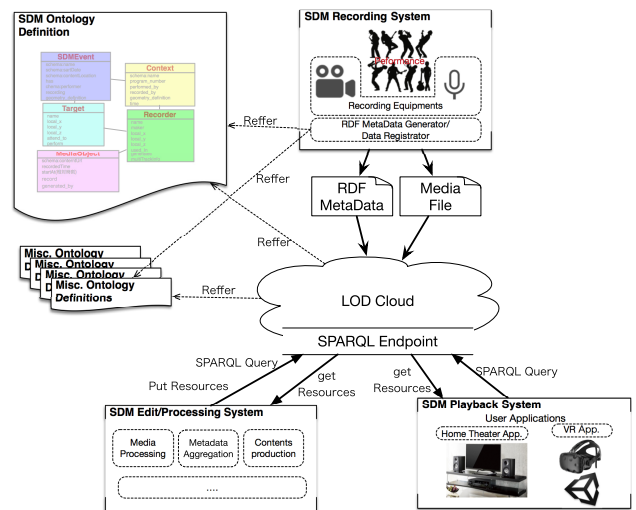


図 2 LoD クラウドによる SDM アプリケーションの構成
Fig. 2 Configuration of SDM application with LoD cloud.

SPARQL を通じてアクセスし、必要なデータを入手して、加工・再生する（図 2）。LiVRation でも同様のアプローチを取って情報取得を行う。

5. LiVRation

本章では LiVRation で用いた収録コンテンツの詳細と、システムの設計指針、実装の詳細について述べる。なお、LiVRation は CiP 協議会*4が主催しているハッカソンイベントである「Billboard LIVE MUSIC HACKASONG 2017」のために作成されたシステムで、「Live で Vibration を伝える VR 配信」というコンセプトをもとに開発されている。

5.1 システム概要

LiVRation は HMD を使った没入環境において立体音響環境を体験することができる。また、MPEG4-ALS を使ったハイレゾ音声のストリーミング再生を実現している。視聴者は、HMD を用いて仮想空間を自由に動き回るとともに、視聴位置での音響空間を仮想的に体験することが可能であり、特定の楽器・音源のみの抽出や、Twitter からの情報表示、振動伝達デバイスからの振動を感じることもできる。図 3 に動作画面を示す。画面上に表示されている球状のオブジェクトに収録された 360 度動画 (Video Objects) や音声 (Audio Objects) がマッピングされている。また、視聴者を囲うように Twitter のコメント (Twitter 3D barrage) が表示されている。

以下では、コンテンツの収録環境、システムの設計指針、実装について詳細を述べる。

5.2 収録環境

LiVRation で利用するコンテンツは、2018 年 1 月 30 日

*4 <https://takeshiba.org/>



図 3 LiVRation の動作画面
Fig. 3 Operation screen of LiVRation.

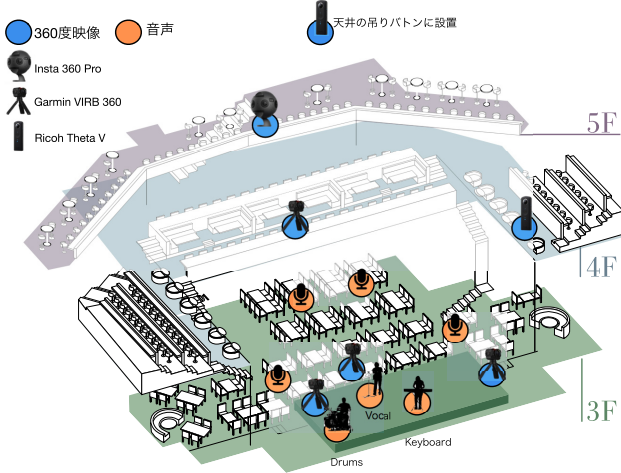


図 4 ビルボードライブ収録 (2018) のカメラとマイクの配置
Fig. 4 Recording environment.

に Billboard Live Tokyo で行われた「仮谷せいら」のライブリハーサルである。リハーサル中に収録した映像、音声を配信コンテンツとして完成させ、収録から約 4 時間後にはイベント本番での最終発表を行った。

図 4 に、バンドの編成、360 度カメラの設置場所、マイクの設置場所を示す。ライブの構成は、ボーカルにシンガソングライターの「仮谷せいら」で、バックバンドにドラムを担当する松浦と、キーボード、ベースを担当する川原という構成であった。会場におけるリスナへの表現手法としては、すべての楽器にマイク或いは電気信号を増幅する機材を接続し、Sound Reinforcement (SR) 用ミキシングコンソールで調整されたのちに大規模なスピーカで再生される。音圧レベルは場所にもよるがおおよそ 100 dB SPL となる。

舞台内のマイク構成については、楽器単体のほかにオーディエンス用のマイクを 4 本設置することとした。音源より近いポジションとしてステージ袖の上手、下手に 1 本ずつ、もう 2 本は天井から無指向性のマイク (DPA4090) を 2 本つりさげた構成とした。音源より近いマイクはステージ角の位置、高さ 1m に設置した。音源より遠いマイクについてはステージから奥に 5m、高さ 5m のところ

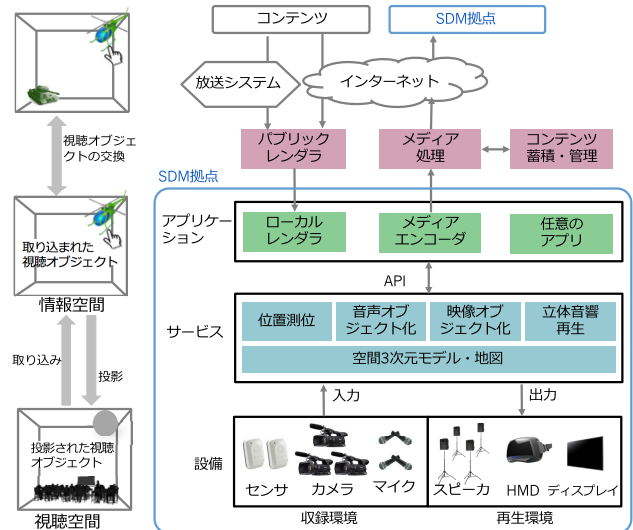


図 5 SDM アーキテクチャ
Fig. 5 SDM architecture.

にセンターを中心に約 1m の幅で 2 本設置した。収録音声はすべて SR 用ミキシングコンソールに纏められおり、コンソールの Head Amp 分岐をデジタルで Digital Audio Workstation (DAW) に転送するシステムとなっている。録音される音量レベルはすべてミキシングコンソールの設定に依存するため、後に整音作業が必須となる。録音したデータを編集用の DAW にて、それぞれボーカルと楽器ごとの単体で纏め上げた音源 (VocalMix, DrumsMix, BassMix, KeyboardMix) に編集し、さらに観客席の左奥、右奥、左手前、右手前のマイクによるアンビエンス Mix を編集した。

映像を収録する 360 度カメラは、「Insta 360 Pro」1 台、「Garmin VIRB 360」4 台、「Ricoh Theta V」2 台を利用し、すべてのカメラで 3,840 × 1,920@30 fps (4K) での撮影を行った。Insta 360 Pro は、6 枚の F2.4 魚眼レンズを備えたハイエンド 360 度カメラであり、ライブ会場の全景を撮影するため、5 階席に設置した。Garmin VIRB 360 は、2 枚のレンズを備えた 360 度カメラであり、設置場所は、ハッカソンの審査員席に利用された 4 階正面、ボーカルの真前、ドラムの真前、ステージ右横の 4 カ所を選択した。Ricoh Theta V は、2 枚のレンズを備えた 360 度カメラであり、最も軽いため、ライブ会場の天井に吊ってあるバトンに 1 台設置した。また、もう 1 台を 4 階席右手に設置し撮影を行った。

5.3 設計

LiVRation は図 5 に示す SDM アーキテクチャ [2], [3] に基づいて設計を行った。SDM アーキテクチャは、ネットワーク上に存在するコンテンツおよびその配信システムと、実空間内の各種情報を SDM オブジェクトとして情報空間に取り組み、その結果を自在に視聴空間に投影する

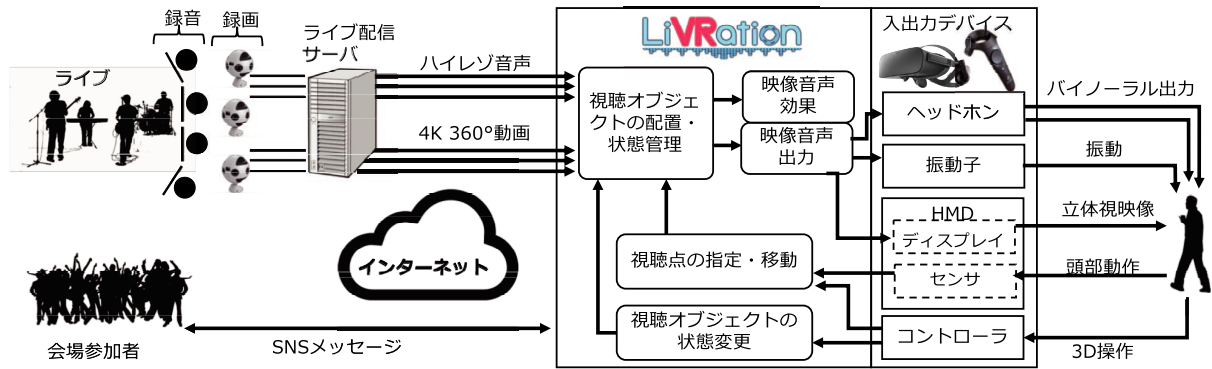


図 6 LiVRation 設計概要

Fig. 6 Design of LiVRation.

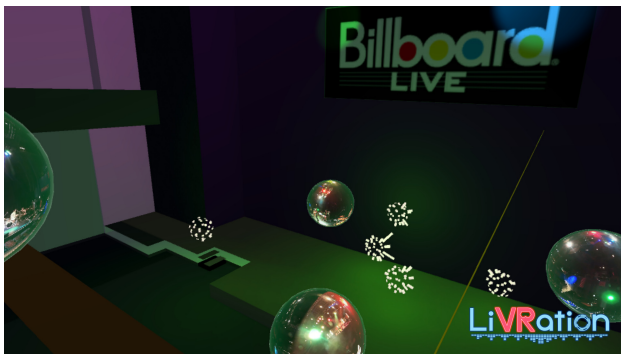


図 7 仮想空間への SDM オブジェクトの配置

Fig. 7 SDM-object placement in virtual space.



図 8 コントローラによる音声オブジェクト操作 (音量操作)

Fig. 8 Audio-object manipulation.

SDM 拠点から構成される。

LiVRation も SDM アーキテクチャに準拠した設計となっている。図 6 に LiVRation の設計概要を示す。

前節に述べた収録済みの映像音声は、対象となる 1 曲を切り出して編集され、ライブ配信サーバに格納する。ライブ配信サーバからネットワークを通じて、ハイレゾ音声と 4K 360 度動画を SDM 拠点である LiVRation クライアントへとストリーミング配信する。クライアントでは、これらの映像音声ストリームを音声、動画を表す SDM オブジェクトとして扱い、図 7 のようにあらかじめ製作しておいた仮想空間内に配置し、すべてのストリームのバッファが一定量蓄積したのちに再生を行う。

音声は、音声オブジェクトと視聴位置との距離関係から、音量と聞こえる方向を決定し、ヘッドホンからバイノーラル出力される。また、ヘッドホンジャックからローパスフィルタを通して低音成分に反応する振動子を接続し、身体に装着することでより臨場感の高い体験を提供する。さらに、音声は周波数成分の音量ごとに異なるバーの長さが変化する映像効果を付与することで、可視化を行う。

360 度動画は球体の両面に貼り付け再生を行い、これらの動画や映像効果は HMD の両眼映像を通じてユーザーに立体的な映像を提示する。ユーザーは、HMD のセンサを通じて頭部の動きを LiVRation クライアントに伝える。これにより自由に視聴したい方向を向くことが可能であり、3 次元の動

きを取得できるコントローラを 3D 操作することで、様々な意図をインタラクティブにシステムに伝えることができる。

ユーザーはコントローラを使って、音声の制御や視聴位置の移動などを行うことができる。具体的には、コントローラで音声を掴んだ状態で、自分の方に引く操作により、その音声だけをソロで視聴すること可能であり、歌声をアカペラで聞いたり、楽器の音をインストルメンタルで聞いたりすることができる。反対に音声を掴んだ状態で、向こう側に押し込む動作で、すべての音声を有効化して通常どおり音声が混ざった状態で音声を聞くことができる。加えて、音声を掴んだ状態で手首をひねると音量の強弱を調整できる (図 8)。また、コントローラから照射されるポイントを映像を提示している球体に当たった状態で、選択するとその場所への移動が可能である。

近年、ライブ放送において一体感を味わうため、Twitter などの SNS を通じて、他の視聴者とインタラクションを行うことで、ライブを楽しむことが一般化している。LiVRation では、Twitter の関連ツイートを表示する仮想空間内に提示することで、こうした他の視聴者とのインタラクションを実現する。

5.4 実装

上記の設計指針に基づき、表 1 に示す開発環境、フレームワークを用いて LiVRation を構築した。図 9 にシステムの実装概要を示す。

表 1 LiVRation 実行環境

Table 1 Implemented environments of LiVRation.

実行マシン	CPU : メモリ : グラフィックス : SSD :	Intel®Core-i7-8700K 32.0 GB GeoForce®GTX 1080 Ti 480 GB
HMD		Samsung HMD Odyssey
クライアント開発・実行環境		Unity 2017.2.0f3 (64-bit)
配信サーバ		Wowza Streaming Engine 4.7.5
サービス		NodeRED v0.17.5
SPARQL Endpoint		graphdb-free-8.3.0
時系列データベース		Elasticsearch v5.6.2

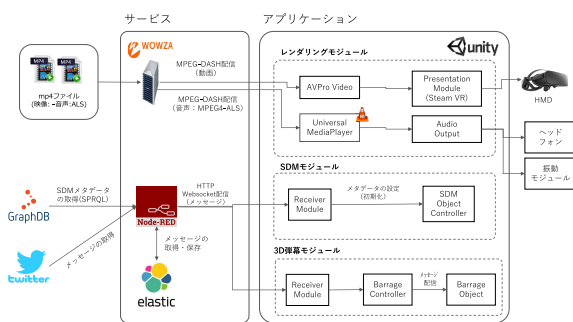


図 9 LiVRation 実装概要

Fig. 9 Implementation of LiVRation.

コンテンツ配信の仕組みとしては、配信サーバである Wowza^{*5}に mp4 にエンコードした収録動画、音声を配置することで実現している。それぞれの配信コンテンツには URL が自動的に付与され、MPEG-DASH などで配信することができる。なお、Wowza は MPEG4-ALS にも対応している。

これらのストリーミングデータを Unity^{*6}で実装した LiVRation クライアントが受信する構成となっている。構築環境としては、今回の実装では Wowza はローカルネットワーク内に配置し、そこからクライアントがストリーミング配信を受ける構成とした。技術的にはインターネット上からの配信も可能ではあったが、今回デモンストレーションを行ったライブ会場などでは一定品質の通信環境の調達が難しかったためにローカルネットワークの構成とした。また、インターネット上から配信する場合、コンテンツ調達のための認証などの仕組み構築が課題になると考えられるが、本研究では今後の課題とした。

LiVRation クライアントからストリーミングデータ以外を取得するサービスは、NodeRED^{*7}を使って、HTTP のサービスとして実装した。具体的には、NodeRED の Twitter API を使って配信コンテンツに関する Tweet を収集するモジュールと、クライアントの初期化時に SDM

*5 <https://www.wowza.com/products>

*6 <https://unity.com/ja>

*7 <https://nodered.org/>

オントロジを格納している GraphDB に対して SPARQL クエリを投げ、その結果を LiVRation クライアントに送信する機能を持つ。前者については、たとえば「仮谷せいら」といったキーワードをあらかじめ設定しておく、それに対応したメッセージが websocket で継続的にクライアントに送信される。過去データについては、時系列データベース (Elasticsearch) に保存され、初期化時に送られる実装となっている。

LiVRation クライアントには、コンテンツの受信や映像・音声のエンコード、レンダリングするモジュールをや各種サービスの情報を受けて画面内に反映、表示する機能モジュールを配置している。具体的には、以下のモジュールを有する。

レンダリングモジュール：Wowza からのストリーミング

データは Unity のプラグインによって処理されて表示される。動画は AVPro Video プラグインによって球体オブジェクトのテクスチャにマッピングされ、360 度動画として再生される。この際、360 度カメラで収録した音声も同時に取得できるが、MPEG4-ALS のストリーミングデータを利用するためにミュートしている。音声は UniversalMediaPlayer プラグインを使って音声オブジェクトにマッピングされ、周波数成分の音量によって変化するエフェクトが加えられる。UniversalMediaPlayer は VLC と FFmpeg をベースとしたプラグインであり、MPEG4-ALS の再生も可能である。エフェクトについては Rhythm Visualizer Pro プラグインを用いて実現している。前節で述べた距離による音声ミックスは、Unity によって自動計算され、出力された音声はヘッドフォンや振動デバイス [30] で再生することができる。なお、動画・音声それぞれに対して、現状では特定の同期処理を行っていない。動画は配信コンテンツがプラグイン内ですべて再生可能となった時点で再生される。音声は音声オブジェクトが個別に再生可能と判断された時点で再生が自動再生される。再生のタイミングについては、UniversalMediaPlayer プラグインのバッファに関するパラメータによって多少は調整することが可能であるが、Wowza からの配信タイミングに依存するので、映像との完全な同期は Unity だけでは実装が難しい。これらの高度な同期処理については今後の課題であるが、ローカル環境での再生においては、ネットワーク速度が十分であるため、再生のズレが気になるようなことはほとんどない。

上記に加えて、HMD のセンサやコントローラの実操作に応じて、視聴位置である球体オブジェクトの中を旋回・移動したり、音声オブジェクトへの操作によって音量を調節する機能を有する。

SDM モジュール：SDM オブジェクトのメタデータ (音

源、演奏者、位置情報など)は、クラウド上に構築された SPARQL endpoint である GraphDB から、サービス層を介して LiVRation クライアントに取得される。クライアントの初期化時に Unity から、サービスプラットフォームに対して HTTP でアクセスすると、あらかじめ用意された SPARQL クエリで GraphDB に問合せを行い、その結果がクライアントに送られる。そこで取得したメタデータをレンダリングモジュールなどに渡す実装となっている。今回実装した LiVRation のために定義したオントロジの抜粋とインスタンス構成 (図 10) を以下に示す。

```

@prefix sdm: <http://sdm.hongo.wide.ad.jp/sdm/> .
@prefix sdm: <http://sdm.hongo.wide.ad.jp/resource/> .

#### Define SDMEvent
sdm:hackasong rdf:type sdm:SDMEvent ;
  s:contentLocation sdm:billboard ;
  s:name "Billboard LIVE HACKASONG 2017"@ja ;
  s:startDate "2018/1/30 17:30" ;
  sdm:has sdm:song1 ;
  sdm:recording sdm:bass_mic ,
                sdm:drum_mic ,
                sdm:far_left_mic ,
                sdm:far_right_mic ,
                sdm:keyboard_mic ,
                sdm:near_left_mic ,
                sdm:near_right_mic ,
                sdm:vocal_mic .

#### Define Context
sdm:song1 rdf:type sdm:Song ;
  s:name "Colorful World" ;
  sdm:performed_by sdm:bass ,
                  sdm:drum ,
                  sdm:keyboard ,
                  sdm:vocal ;
  sdm:program_number "1" ;
  sdm:recorded_by sdm:bass_mix ,
                  sdm:drum_mix ,
                  sdm:far_left_mix ,
                  sdm:far_right_mix ,
                  sdm:keyboard_mix ,
                  sdm:near_left_mix ,
                  sdm:near_right_mix ,
                  sdm:vocal_mix .

#### Define Target
sdm:vocal rdf:type sdm:Musician ;
  s:name 仮谷せいら"@ja ;
  sdm:attend_to sdm:hackasong ;
  sdm:localX "0.0"^^xsd:float ;
  sdm:localY "0.5"^^xsd:float ;
  sdm:localZ "4.5"^^xsd:float ;
  sdm:perform sdm:song1 .
    
```

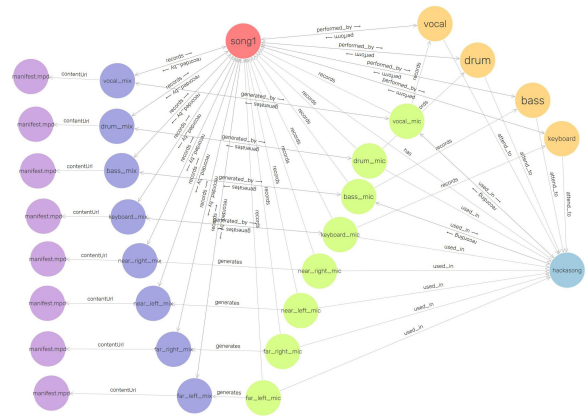


図 10 LiVRation のインスタンス構成
 Fig. 10 Description about the contents of LiVRation.

SDMEvent である sdm:hackasong や Context である sdm:song1 を中心に performed by でリンクされる演奏者 (Musician クラス), recorded by でリンクされる音源 (AudioRecorder クラス) がある。演奏者である sdm:vocal には音源を設置するそれぞれの座標位置 (sdm:localX~Z) が記述されている。同様に音源に対しては、メディア配信用の URL が記述される。

3D 段幕モジュール: Twitter などのソーシャルメディアから取得したライブに関するコメントなど、3D コンテンツ上に表示するためのモジュールで、Twitter からのタグ付きコメントやプロフィールイメージなどを取得・取得することができる。SDM モジュールと同様に、アプリケーションの初期化時にサービスプラットフォームの特定の URI にアクセスすることで、websocket によって継続的にデータが送られてくる実装となっている。視聴位置の周りをアイコン化された Twitter メッセージが、回りながら次々と表示される演出となっている。なお、弾幕の表示はコントローラで制御 (表示/非表示) することが可能である。

6. 評価

LiVRation についてコンテンツ配信含めたネットワーク評価と主観評価を行った。加えて、Billboard LIVE MUSIC HACKASONG におけるデモンストレーションの様子について述べる。

6.1 ネットワーク性能評価

今回のコンテンツでは、8つの360度動画と7つの音声をそれぞれストリーム配信しており、コンテンツ内で同時再生している。動画と音声の再生時間は2分14秒で、データ容量はそれぞれ、160Mバイト、5Mバイト程度であった。コンテンツ開始時からキャプチャしたネットワークの状態を図 11 に示す。

ローカルネットワークでの配信環境では、おおむね

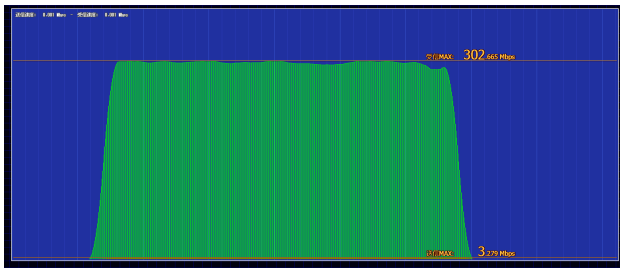


図 11 起動時のトラフィック計測
Fig. 11 Traffic measurement at startup.

300 Mbps 程度の受信速度であった。それぞれの Unity プラグインの仕様だと考えられるが、動画については最初にコンテンツをすべてダウンロードしており、ダウンロードが終わると、音声ストリームのみの 15 Mbps 程度となる。音声ストリームについては、コンテンツの終わりまで継続的にデータを受信しているのが確認できる。なお、インターネット上の配信サーバを指定した場合、最大で 100 Mbps 程度の速度であり、動画の再生に 30 秒程度かかった。中庭らの研究 [31] によると、家庭までの 4K 映像をネットワーク配信する場合、ビットレートは 100 Mbps 以下に設定する必要があるとあり、ハードウェアやプレーヤのスペックに依存するものの、主観評価では 50 Mbps であれば視聴者は十分に満足できるとある。将来的に、動画についても、キャッシュせずにリアルタイム配信できることを考えると、音声ストリームが 15 Mbps であり、差分の 75 Mbps 程度は動画に充てることができるといえるため、十分に高品質なコンテンツを配信できる可能性がある。しかしながら、家庭においては、一般的にベストエフォート型の回線であることに加え、外乱も多いと考えられるため、ローカルネットワーク環境内にキャッシュ用のサーバやミドルウェアが必要と考えられる。

6.2 主観評価

6.2.1 アンケート収集

2018 年 5 月 13 日～15 日に行われた Interop Tokyo 2018^{*8}の展示ブースにおいて、LiVRation の体験者を対象にアンケートを使った主観評価を実施した。評価においては、事前に体験者に LiVRation の使い方を提示し、自由に体験をしていただいたうえで、体験後にアンケートに記載いただいている。体験者の総数は 211 名で、内訳としては男性 181 名、女性 23 名であった。年齢別の内訳は、10 代 12 名、20 代 74 名、30 代 50 名、40 代 48 名、50 代 24 名、60 代 2 名である。また、映像音響の専門家は 21 名、非専門家は 163 名であった (27 名は無回答)。なお、Interop Tokyo 2018 の主催者によると、イベントの参加者は 143,806 名であり、主要な訪問者は情報システム、ネットワーク関連会社のエンジニアやセールス、研究者である。

^{*8} <https://www.interop.jp/>

6.2.2 アンケート項目

アンケート項目は、以下に示す設問 Q1 から Q7 までの 7 つを、それぞれ 1 から 7 までの 7 段階のリッカート尺度を用いて設定した。それぞれの回答に関して、最低の 1、中間の 4、最高の 7 の回答の目安を括弧内に記載した。

- Q1 映像の立体感は感じられましたか？
- Q2 音声の立体感は感じられましたか？
- Q3 音声は映像の方角と比べて正しい位置で鳴っているように聞こえましたか？
- Q4 映像が動いたとき、音声も追従して動いたと感じられましたか？
- Q5 インタラクティブな視聴体験の操作は簡単にできましたか？
- Q6 音量可視化による音声オブジェクトの有効化・無効化は直感的でしたか？
- Q7 音声オブジェクトを有効化・無効化することで個別の楽器の音色を聞くことができましたか？

設問 Q1 と Q2 は映像と音声の基本的な立体感を問う設問であり、設問 Q3 と Q4 はその組合せが正しく一致しているように知覚されるかを問う設問である。設問 Q3 では静止時の音声の聞こえる方角と位置を問い、Q4 では動いたときの映像と音声の追従性についての問いを設定した。設問 Q5 と Q6 はコントローラによるインタラクティブな視聴に関する問いであり、Q5 は全般的な操作の容易さについての問いで、Q6 では音声オブジェクトの可視化および操作についての問いを設定した。設問 Q7 は音声オブジェクトに分解された個別の音声オブジェクトの音色が聞けたかを問う。加えて、システム改修の際に要求する重要視する機能についての設問を設け、アンケートの末尾には、「感想・要望・その他」という自由記載項目を用意して、視聴体験のコメントを得た。

6.2.3 結果

主観評価の結果を図 12 に示す。X 軸は 1 から 7 までの 7 段階の回答の比率をパーセントで表し、棒グラフの位置は、尺度の中間である 4 を X 軸の 0 の中央に配置し、左に行くほど低評価、右に行くほど高評価という配置で描画した。

Q2 のみ高評価の割合が低いが、ほぼすべての項目について、6 または 7 という高評価となった。これだけでは傾向が見えないため、性別および年齢別の評価も実施した。なお、比較においては、全体の平均値とそれぞれの項目を比較するクロス集計による評価を行っており、設問については先行研究 [6] と同一である。結果としては、似た傾向を示しているが、先行研究で平均以下の比率が 20% を超えていた設問 Q1、Q5 については改善がみられる。先行研究では、タブレットや指による操作であったのが、VR デバイスと専用コントローラにより、没入感とインタラクティブ性が改善されたといえる。

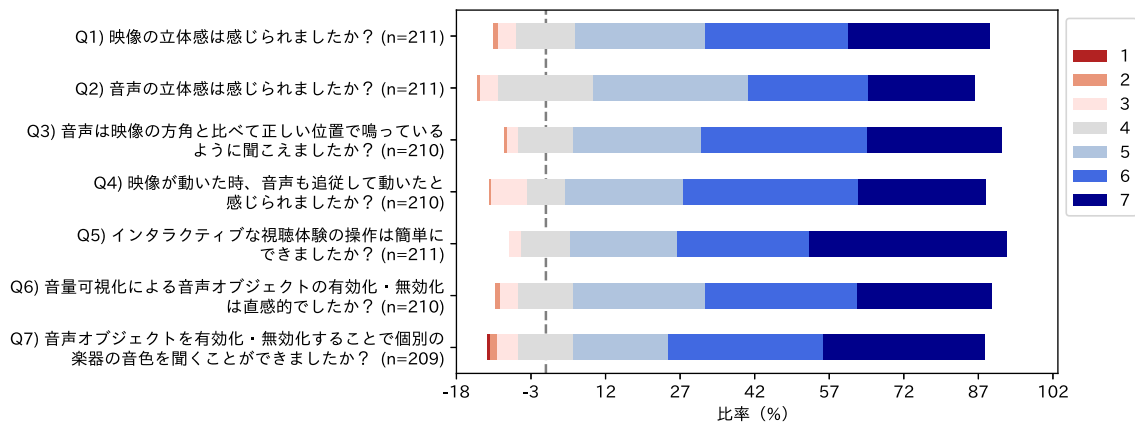


図 12 主観評価の集計結果

Fig. 12 Questionnaire results with likert scales.

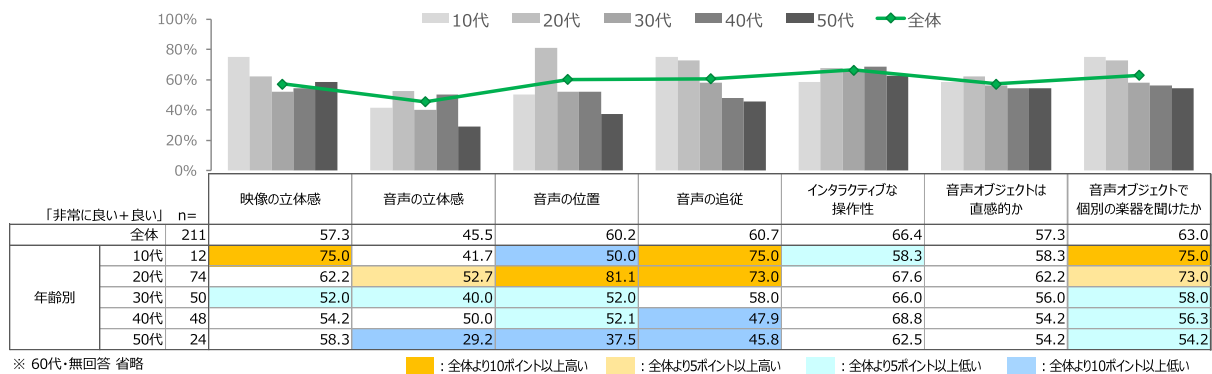


図 13 年代別分析（高評価のみ抽出）

Fig. 13 Results of the generation-wise data extraction based on high scores (6 or 7).

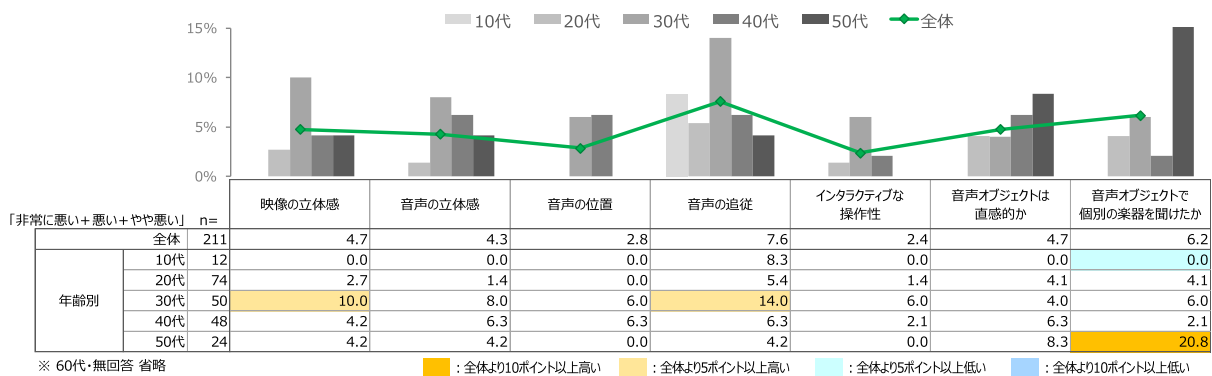


図 14 年代別分析（低評価のみ抽出）

Fig. 14 Results of the generation-wise data extraction based on low scores (1 or 2).

図 13 は、年齢別に高評価のみを抽出したグラフである。10代および20代について、Q4およびQ7の割合が高いのが分かる。また、40代、50代については、音声の定位・追従にかかわるQ2、Q3、Q4の割合が低い。低評価（1または2）を抽出したグラフ（図 14）について分析してみると、50代のQ7に関する評価が低かった。よりVRなどに親しんでいる若年層の方が、立体音響を意図どおりに受容することができているといえる。

図 15 は、システム改修時に重要視する機能を年齢別に取りまとめたものである。一番多いのは映像の高品質化で

あったが、専門家に対しては高音質化が多いことが分かる。10代については、ネットワーク越しにチャットをするニーズが大きいことも分かる。

最後に自由記載項目について述べる。「より自由な視点でライブを追体験できた」、「生で見る以上の体験ができる」、「お金を払ってでも使いたい」というポジティブな意見も見られたが、インタフェースの難しさ、分かりにくさを指摘するコメントもあった。具体的には、コントローラで音声を掴んだ状態での押す、引くといったジェスチャーによって個別の音声オブジェクトの音のみを抽出する動作について

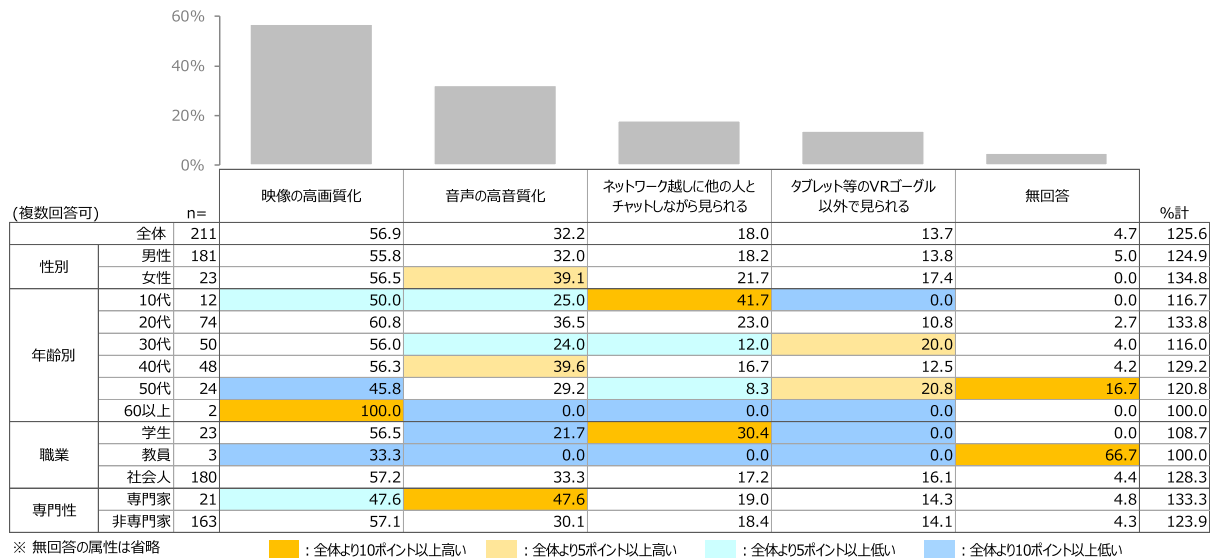


図 15 バージョンアップで一番重要な項目
 Fig. 15 Results of the requests for improvement.

て、直感的でない、反応が悪いといった意見も多かった。HMD のコントローラを使った操作方法については改善の余地があるといえる。また、ヘッドフォンの性能、360 度動画の画質向上や軽量化がなされれば、より没入感が高まったという指摘もあった。これはロスレス音源で配信を行ったものの、騒がしい会場の中での視聴に加え、HTC VIVE に付属する耳を囲わないオンイヤータイプのヘッドフォンを利用した影響があると考えられる。今後は音質も考慮した、より適切な VR デバイスの採用も検討したい。ユニークな意見としては、360 度動画を使った際に観客がそのまま映り込んでしまうことに対するプライバシーに考慮が必要という意見があった。リアルタイム配信、ビジネス化などを行う際は、考慮が必須となるだろう。その他の意見について、表 2 に列挙する。

6.3 デモンストレーション

2018 年 1 月 30 日にビルボードライブ東京で行われた「Billboard LIVE MUSIC HACKASONG 2017」の審査において、LiVRation のデモンストレーションを行った。5.2 節で述べたように、事前に行ったりハーサルにて収録を行い、そのデータを用いてデモンストレーションを行った。デモンストレーションでは、HMD を装着したステージ上の操作者の視聴音声・映像が、会場のプロジェクターやステージの左右に設置されているのスピーカーで再生されるというものであったが、LINE LIVE によるライブ中継により 3,600 人以上に視聴され、その後も様々なメディアで記事が発表されるなど、非常に反響が大きかった。審査員のコメントとしては、「完成度が高い」「すぐにでも使いたい」などのコメントがあり、結果として審査員による最優秀賞、および観客の投票数で決まる会場賞をダブル受

表 2 自由記述欄のコメント

Table 2 Comments in free description column.

上空からの Viewing は感動した。
3D 映像にしてほしい。
カメラ 2 台で撮影して 3D で見られるようになれば、よりリアルな体験になると思いました。
音声にも立体感があるとよいと思います。
ボリューム等、音の操作が難しかった。
ポジションチェンジのボタンが分かりにくかった。
音量調整するとき、ポインタを当て続ける必要があるので、設定値を見ながら操作をするときに難しさを感じた。
観客の視点、チケットの入手が難しい最前列等の映像が見られるなら、有料でも体験したいと感じました。
ぜひスポーツ戦での利用を実現してほしい。
ライブ以外にもいろいろな使い方ができそうな VR 体験でした。もっと多ジャンルに広がったら面白そうだと思います。
眼鏡に圧迫感がある。
メガネに優しいゴーグルが欲しいです。
自分のメガネで見れたりできたら嬉しい。

賞した。先行研究 [6] は、昨年度行われた同イベントで次点の優秀賞にとどまっていたが、VR による配信機能を付加したことで、専門家にも一般の方にも、より魅力的なアプリケーション・プラットフォームとして認識されるようになったといえるだろう。また、今回の受賞によって、ビジネス的なポテンシャルについても確認することができたと考えている。

7. まとめと今後の課題

本論文では、収録したライブを HMD を利用して自由視点で視聴するとともに、収録された音声を自由にコントロールすることが可能な LiVRation について述べた。本

研究の目的として、「3次元の映像・音声の演出をソフトウェアで制御」、「自由な視聴体験」、「遠隔配信」、「高臨場感・没入感」、「インタラクティブな体験」を設定したが、それぞれについて、1) SDM アーキテクチャによる設計、2) ゲームエンジン (Unity) での実装、3) ライブ配信サーバの構築および SDM オントロジによるメタデータ記述、4) VR, ロスレス配信, 振動伝達デバイスの導入、5) コントローラによる音源 (SDM オブジェクト) 操作および SNS 連携, といった技術要素を取り込むことで達成できたと考える。しかしながら録音環境, 再生環境, HMD によるインタフェースについて課題が顕在化した。

5.2 節で述べた録音環境においては, スポットライトが当たった部分の映像が白飛びする現象が確認された。一般的にライブ会場は暗く, 撮影中にコントラストの調整が困難であったためであるが, こうした環境での撮影手法の確立も課題だろう。音声についても, 高品質なコンテンツとするためには, プロフェッショナルによるミックスが必須である。今回の試作環境では, 音声・映像それぞれの再生タイミングは Unity に依存する構成となっていたが, ネットワーク環境によっては, 再生タイミングが著しくずれ, それによって没入感が阻害されるという結果になった。対策としては, 音声・映像の同期のためのミドルウェアや, 映像キャッシュ用のプロキシ・サーバなどをローカル環境に構築することが考えられる。しかしながら, 実際のライブ環境においても距離によっては音声に遅れが発生するため, 多少のずれであれば, 没入感の阻害にならない可能性はあるため, SDM オントロジなどを参照しながら, 距離によって柔軟な補正を行う機構の導入が必要とである。

今後は, 6.2 節で述べた, ユーザインタフェースや没入感の改良に加えて, SDM アプリケーションの BIM (Building Information Modeling) との連動について検討を行っていく計画である。LiVRation では, 3D モデリング用のソフトウェアである SketchUp で作ったモデルを Unity に取り込んだが, 近年の建設プロジェクトでは, 3次元形状や属性情報を含む BIM を使った設計が一般化している [32]。それらの属性情報や寸法などの 3次元形状データを, SDM オントロジなどと連携させることで, より簡便なアプリケーション制作が可能になると考えている。

参考文献

- [1] Liebchen, T. and Reznik, Y.A.: MPEG-4 ALS: An emerging standard for lossless audio coding, *Proc. Data Compression Conference, DCC 2004*, pp.439-448 (2004).
- [2] 塚田 学, 小川景子, 池田雅弘, 曾根卓朗, 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 (2017).
- [3] Tsukada, M., Ogawa, K., Ikeda, M., Sone, T., Niwa, K., Saito, S., Kasuya, T., Sunahara, H. and Esaki, H.: Software Defined Media: Virtualization of Audio-Visual Services, *IEEE International Conference on Communications (ICC2017)* (2017).
- [4] 菰原 裕, 塚田 学, 江崎 浩, 曾根卓朗, 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 (2017).
- [5] 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: SDM360²: 音楽イベントのための自由視聴点映像音声のインタラクティブ再生, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2017) シンポジウム (2017).
- [6] 塚田 学, 菰原 裕, 粕谷貴司, 新居英明, 高坂茂樹, 小川景子, 江崎 浩: SDM360²: インタラクティブ 3D コンテンツの自由視聴点再生, 情報処理学会論文誌デジタルコンテンツ (DCON), Vol.6, No.2, pp.10-23 (2018).
- [7] ITUR Rec. ITU-R BS. 2051-0 (02/2014) advanced sound system for programme production, *Int. Telecommun. Union, Geneva, Switzerland* (2014).
- [8] Nakasu, E.: Super Hi-Vision on the horizon: A future TV system that conveys an enhanced sense of reality and presence, *IEEE Consumer Electronics Magazine*, Vol.1, No.2, pp.36-42 (2012).
- [9] 濱崎公男, 火山浩一郎: 22.2 マルチチャンネル音響システム, 平成 17 年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, pp.3-7 (2005).
- [10] Dolby Atmos[®] Specifications: Technical Report Issue 3, Dolby Laboratories (2015).
- [11] AUROMAX[®] Next generation Immersive Sound system (2015).
- [12] Herre, J., Hilpert, J., Kuntz, A. and Plogsties, J.: MPEG-h 3D audio—The new standard for coding of immersive spatial audio, Vol.9, No.5, pp.770-779 (2015).
- [13] Bleidt, R., Borsum, A., Fuchs, H. and Weiss, S.M.: Object-based audio: Opportunities for improved listening experience and increased listener involvement, *SMPTE Motion Imaging Journal*, Vol.124, No.5, pp.1-13 (2015).
- [14] Gerzon, M.A.: Periphony: With-height sound reproduction, *Journal of the Audio Engineering Society*, Vol.21, No.1, pp.2-10 (1973).
- [15] Poletti, M.A.: Three-dimensional surround sound systems based on spherical harmonics, *Journal of the Audio Engineering Society*, Vol.53, No.11, pp.1004-1025 (2005).
- [16] 金順 映, 仲地孝之, 江村 暁, 藤井竜也, 羽田陽一: 4K マルチ映像と 6 チャンネルエコーキャンセラを用いた超高臨場遠隔コラボレーションシステム, 電子情報通信学会技術研究報告, CQ, コミュニケーションクオリティ, Vol.112, No.10, pp.87-92 (2012).
- [17] 藤井竜也, 藤井哲郎, 小野定康, 白川千洋, 白井大介: デジタルシネマ劇場へのライブ配信 (ODS) 技術, 電子情報通信学会基礎・境界ソサイエティ Fundamentals Review, Vol.5, No.1, pp.80-89 (2011).
- [18] Hirata, K., Harada, Y., Takada, T., Aoyagi, S., Shirai, Y., Yamashita, N., Kaji, K., Yamato, J. and Nakazawa, K.: t-Room: Next generation video communication system, *2008 IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2008)*, pp.1-4 (2008).
- [19] 平田圭二: 未来の電話を考える—遠隔コミュニケーションシステム t-room (特集コミュニケーション環境の未来に向けた研究最前線), *NTT 技術ジャーナル*, Vol.19, No.6, pp.10-12 (2007).

- [20] Cruz-Neira, C., Sandin, D.J. and DeFanti, T.A.: Surround-screen projection-based virtual reality: The design and implementation of the cave, *Proc. 20th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH 1993*, pp.135-142, ACM (1993).
- [21] 廣瀬通孝, 小木哲朗, 石綿昌平, 山田俊郎: 多面型全天周ディスプレイ (CABIN) の開発とその特性評価, 電子情報通信学会論文誌, D-II, 情報・システム, II-情報処理, Vol.81, No.5, pp.888-896 (1998).
- [22] 小木哲朗, 茅原拓朗, 加藤允文, 浅山 宏, 廣瀬通孝: 没入型多面ディスプレイのためのインタラクティブ高臨場感音場提示手法, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.8, No.1, pp.75-83 (2003).
- [23] 大久保洋幸, 大谷眞道, 小野一穂, 正岡顕一郎, 池沢 龍, 小宮山撰, 浅山 宏, 湯山一郎: CG 同期したインタラクティブ音場再生システムについて, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.5, No.3, pp.965-973 (2000).
- [24] 大久保洋幸, 中山靖茂, 池永敏和, 小宮山撰: インタラクティブ 3D 映像音響再生システム, NHK 技研 R&D ('04 [NHK] 技研公開講演・研究発表特集号 (1)), No.86, pp.72-79 (2004).
- [25] 後藤 真: 人文社会系大規模データベースへの linked data の適用—推論による知識処理, 情報知識学会誌, Vol.25, No.4, pp.291-298 (2015).
- [26] Dickinson, M.E., Flenikien, A.M., Ji, X., Teboul, L., Wong, M.D., White, J.K., Meehan, T.F., Weninger, W.J., Westerberg, H., Adissu, H., et al.: High-throughput discovery of novel developmental phenotypes, *Nature* (2016).
- [27] Raimond, Y., Abdallah, S.A., Sandler, M.B. and Giasson, F.: The Music Ontology, *Proc. International Conference on Music Information Retrieval*, pp.417-422 (2007).
- [28] 粕谷貴司, 塚田 学, 菰原 裕, 高坂茂樹, 水野拓宏, 野村謙登, 上田雄太, 江崎 浩: LiVRation: VR による自由視聴点映像音声のインタラクティブ再生, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2018) シンポジウム (2018).
- [29] Atarashi, R., Sone, T., Komohara, Y., Tsukada, M., Kasuya, T., Okumura, H., Ikeda, M. and Esaki, H.: The Software Defined Media Ontology for Music Events, *Workshop on Semantic Applications for Audio and Music, Proc. SAAM '18* (2018).
- [30] 仲谷正史, 寛 康明, 南澤孝太, 三原聡一郎, 館 [ススム]: 触感表現の一般普及に向けた方法論とテクニカルワークショップを通じたその実践 (特集ハプティックコンテンツ), 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.19, No.4, pp.593-603 (2014).
- [31] 中庭 涼, 藤井 哲: 4K 超高精細映像の配信技法に関する検討, 東京都市大学環境情報学部情報メディアセンタージャーナル, Vol.13, No.1, pp.33-38 (2012).
- [32] 仲間祐貴, 大西康伸, 位寄和久: 継続的利用と情報共有を可能にする建物維持管理支援のための BIM を活用したウェブシステムの開発, 日本建築学会技術報告集, Vol.22, No.50, pp.359-364 (2016).



粕谷 貴司

2005年東京農工大学情報コミュニケーション工学科卒業。2007年慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科修了。2008年竹中工務店入社。ワークプレイスプロデュース本部を経て、2015年情報エンジニアリング本部。建物設備に対する情報エンジニアリングの業務や研究に従事。2017年より東京大学大学院情報理工学系研究科に所属。



塚田 学

2005年慶應義塾大学環境情報学部卒業。2007年慶應義塾大学政策・メディア研究科修士取得。2007年よりフランス・パリ国立高等鉱業学校 (Mines ParisTech) ロボット工学センター博士課程在籍および、フランス国立情報学自動制御研究所 (Inria) で研究員として勤務。2011年博士号取得。現在、東京大学大学院情報理工学系研究科の准教授。2014年より WIDE プロジェクトのボードメンバー、および Software Defined Media (SDM) コンソーシアム・チェア。自動車の情報化等、次世代インターネット IPv6 における移動体通信、SDM に取り組む。



菰原 裕

2016年東京大学工学部卒業。2018年東京大学大学院情報理工学系研究科修士課程修了。研究内容は、Software Defined Media データを LOD 化するためのオントロジーの構築。学業の傍らマジシャンとしても活動。韓国・中国・台湾・タイ・イタリアといった諸外国の大会で受賞。



高坂 茂樹

1998年ヤマハ音楽院ミキサー科卒業。1998年ミキサーズ・ラボ入社。長瀬剛、吉田拓郎、浜崎あゆみ、ジャニーズ等のレコーディング事業に従事。2005年エスイーディー有限会社設立代表取締役就任。IT事業部として通信系、車

載系、医療系のソフトウェアテスト、品質管理を行いながら、音響事業部ではコンサートのレコーディングや音声コンテンツ制作等を行う。2017年一般社団法人IT検証産業協会理事就任。2017年同社を株式会社へ変更。



水野 拓宏

1974年生まれ。芝浦工業大学システム工学部電子情報システム学科卒業。株式会社ダウンゴで数々のネットワークタイトルの設計・システム設計を担当。その後独立。2006年独立行政法人情報処理推進機構（IPA）により天

才プログラマー/スーパークリエイターに認定。2017年株式会社UEIより、B2B/B2C事業をMBO、「株式会社アルファコード」として独立。2007年情報大航海プロジェクトに参加。2017年株式会社インプレスR&D発行「インターネット白書2017」で「拡大するVR」を寄稿。2018年「インターネット白書2018」で「VRの動向」を執筆。2019年「インターネット白書2019」で「VRの動向」を執筆。



野村 譲誉

1979年生まれ。2010年ソフトウェア企業へ入社し、音楽配信サイトのシステム開発に携わり、エンジニアとしてキャリアをスタート。2012年Kickstarterで発表されたOculus Development Kitに衝撃を受け、VRコンテン

ツの自主制作をスタート。2016年株式会社アルファコード入社。VRエンジニアとして数々のVRプロダクトを手がけ、2018年VR事業開発部マネージャーに就任。空間プラットフォーム「Blinky」の開発に携わる。



上田 雄太

2012年岐阜大学数理デザイン研究科卒業。2014年慶應義塾大学メディアデザイン研究科修了。2015年より株式会社CRI・ミドルウェアに勤務。オーディオミドルウェア開発、ゲームエンジンPlugin開発に従事。



江崎 浩

1987年九州大学工学部電子工学科修士課程修了。同年（株）東芝入社。1990年米国ニュージャージー州ベルコア社。1994年コロンビア大学客員研究員。1998年東京大学大型計算機センター助教授。2001年同大学大学院情報理

工学系研究科助教授。2015年同大学大学院同研究科教授、現在に至る。博士（工学、東京大学）。MPLS-JAPAN代表、IPv6普及・高度化推進協議会専務理事、WIDEプロジェクト代表、JPNIC副理事長。