

# 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

小川 景子<sup>1</sup> 塚田 学<sup>2</sup> 江崎 浩<sup>2</sup> 砂原 秀樹<sup>1</sup>

概要：我々が普段音楽や音のコンテンツを聴く際、スピーカーの設置場所やスピーカーから流れる音のコンテンツ・チャンネルは予め設定されており、再生されている音源の場所をリアルタイムで操作することは難しい。また音のコンテンツを編集するには専門的な知識を要し、立体音響を扱う場合は音源の位置を指定する等の更なる知識が必要となる。本研究では、立体音響において近年取り入れられてきている音声オブジェクトをベースにしたミキシング方式“オブジェクトベース”の音響システムと、3次元での位置情報の取得が可能な位置情報センサーを組み合わせることにより、本来は物理的には触れることの出来ない音を物体として扱うことを可能とする Tangible Sound Object を提案した。Tangible Sound Object は一定空間内で再生されている複数の音源をタッチパネル・スクリーンや光等の視覚的なインターフェースを使用せずにユーザ自らの手で物体として移動、配置が可能なタンジブルインターフェースである。Tangible Sound Object を使用することでユーザは音源(音のオブジェクト)の形、サイズ、位置、距離をイメージできるようになり、パブリックビューイングやアトラクション等のエンタテインメントの分野や環境音のデザインに利用できることが期待される。本稿では主に8つのスピーカーと4つの位置情報取得センサー、最大5個の位置情報タグを使って開発した Tagible Sound Object のシステムとそのシステムを使って行った立体音に関する予備実験、Tangible Sound Object の評価実験とそれらから得られた結果、今後の展望について述べる。

## Tangible Sound Object: A Tangible Interface for Object-based Sound Systems

KEIKO OGAWA<sup>1</sup> MANABU TSUKADA<sup>2</sup> HIROSHI ESAKI<sup>2</sup> HIDEKI SUNAHARA<sup>1</sup>

### 1. はじめに

1881年、クレマン・アデルが史上初のステレオ放送を「テアトロフォン」(“Théâtrophone”)により実現させた。それ以来、サラウンドサウンドやバイノーラルサウンド等、音場を再現するための研究は現在に至るまで様々な分野において行われてきた。近年では、Dolby Atmos[6], [7] や DTS:X[8] 等の映画音響技術の研究が盛んに行われている。これらの音響システムでは、オブジェクトベースの音響システムを採用している。オブジェクトベースの音響システムは従来のチャンネルベースのサラウンドではなく、複数の

サウンドトラックを位置情報と一緒に記録することにより劇場の任意の位置から音を鳴らし、動かすことが出来る。さらに、近年 IP ネットワーク上に音響システムを構築する技術もプロフェッショナルの音響システムに取り入れられている。従来のアナログケーブルではなくイーサネットケーブルで音響システムの配線を行い、ソフトウェアから音響システムを制御できるようになったことで、同じ音場を別の場所や環境で同時に再現することも容易になった。

現在に至るまで、音響システムを使って視聴者が音楽や音のコンテンツを聴く際は『正しい位置に設置されたスピーカーから再生された音を視聴者が正しい場所から聴く』、これが通常の楽しみ方であるが、再生される音源は事前に専門知識を持った技術者により編集されており視聴者が音響システムから流れる音源の位置を操作したり、音そのものの操作をすることはできない。現在の音響システム

<sup>1</sup> 慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科  
Graduate School of Media Design, Keio University

<sup>2</sup> 東京大学大学院情報理工学系研究科  
Graduate School of Information Science and Technology,  
University of Tokyo

では視聴者は『聴く』ことを目的としており、再生されている音そのものを操作する、等の音響システムと視聴者とのインタラクションはない。

インタラクションの分野に於いては、“タンジブル・ユーザ・インターフェース” [10] の研究が行われている。タンジブル・ユーザ・インターフェースはデジタル情報などの目に見えない情報を、モノと組み合わせることによりユーザが物理的に触れるようにする研究である。また、ユーザが音や音楽を自らの身体の動きによってコントロール出来る電子楽器の研究も多数行われている。

本論文では、Tangible Sound Object を提案する。Tangible Sound Object は、実空間でスクリーンや光などの視覚的なインターフェースを使わずにユーザが自ら音を動かし、配置できるタンジブルインターフェースである。ユーザは難しい操作や練習は必要とせず、直感的に操作することが可能である。さらに Tangible Sound Object はユーザの体験や操作を邪魔する要素である重い機器を身につける等の必要もない。Tangible Sound Object を使うことでユーザは音のオブジェクトの形、大きさ (音量)、3次元の位置、音の距離をイメージすることが可能となる。

## 2. 関連研究と課題

先述したように、近年オブジェクトベースの概念が音響システムに取り入れられてきている。音響システムの機能を仮想化・抽象化することによりユーザは目的に合わせて柔軟に音場を構築・再現することが可能になる。ドルビーラボラトリーズは視聴者の周囲を包む臨場感のある音場を再生する技術で主導的な地位を占めるアメリカの企業である。2012年にドルビー [5] は“ドルビーアトモス”という精密な音の低位や移動を表現できる新しい映画音響システムを発表した。このドルビーアトモスで、ドルビーはオブジェクトベースの考え方を採用し、映画の音響技術者が音を3次元で直感的に配置・移動させることを可能にした。

SoundLocus (サウンドローカス) は株式会社アーニスサウンドテクノロジーが製造している次世代空間音響コンテンツを制作するためのソフトウェアである。モノラルを始めステレオやマルチチャンネルの音源をバイノーラルエンコードし、音場空間への音像定位や音像移動を行うことができる [19]。図2のように音をオブジェクトとして扱い、音の配置や移動をソフトウェア上から入力する。

NHK 放送技術研究所ではあたかもそこにいるような臨場感が得られる“スーパーハイビジョン”を2020年の本放送を目指して開発を進めている。スーパーハイビジョンは超高精細映像と3次元音響からなるシステムである [24]。

Software Defined Media (SDM) はオブジェクト指向のデジタルメディアとネイティブ・デジタルなインターネット環境が前提の映像・音響空間を用いたビジネス創造を目指し2014年1月にWIDEプロジェクト [18] のワーキ



Source: ARNIS SOUND TECHNOLOGIES, 2015[19]

図1 Soundlocus 編集画面

ンググループの一つとして設立された。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。SDMでは下層の映像・音響機能を抽象化して管理することで全体の意思決定を行うソフトウェアシステムと、実際の映像・音響の入出力を行うデバイスを引き離して (decoupling) 扱うことが可能となる。これにより、演奏・上映される演目やその演出上の目的のために柔軟かつインテリジェントに映像・音響のシステムを構成することができる [15], [16]。著者はSDMのメンバーであり、本研究はSDMの研究の一つである。

現在、3次元の音場を構成できる音響システムのほとんどはプロフェッショナル用である。オブジェクトベースの音響システムの普及によりユーザが3次元の音場環境を効率的に編集できるようになってきたが、一般人が音場を再現したり編集することは専門知識や経験がないと難しい。また音響システムそのものは音楽や音のコンテンツを『聴く』ことが目的であり、我々は正しい場所に置かれたスピーカーと予めプロによって編集された音を聴いている。音響システムと視聴者の間でインタラクションは無いといえる。

一方で、タンジブルユーザインターフェースについての研究が進んでいる。ミュージックボトル (musicBottles) はMITメディア・ラボのタンジブルメディアグループが開発したタンジブルインターフェースである。ユーザが小瓶の蓋を開けると音楽が流れ、閉じると音楽が止まる。小瓶の蓋を開け閉めすることでデジタルコンテンツへのアクセスが実現する [11], [12]。

リアクタブル (Reactable) はスペインのポンペウ・ファブラ大学ミュージック・テクノロジー・グループにより開発された、テーブル型スクリーンの上の複数のブロックを移動させたり回転させることで音を奏で、操作する電子楽器である。ブロックの数や移動、回転により様々なシンセ

サイザーが生成され、音に合わせてスクリーンの光の動きが変化する [2], [13]。

体の動きやジェスチャーによって音や音楽をコントロールする電子楽器の開発も進んでいる。TENORI-ON は YAMAHA 株式会社とメディアアーティストの岩井俊雄によって共同開発された電子楽器である。16x16 のマトリクスボタンで、直感的に音楽を作り、奏でられる [4]。

テルミンは、1919 年にロシアの発明家レフ・セルゲーエヴィチ・テルミンが発明した世界初の電子楽器である。演奏者は物理的な接触なしに空間の手の動きによって音をコントロールできる。二本のアンテナがあり、一本はピッチのコントロール、もう一本は音量をコントロールする [23]。

Miburi はヤマハ株式会社が 1994 年に発売したウェアラブルの電子楽器である [14]。専用のウェアを着て動くと、センサーが演奏者の動きを音階に置き換えられ、身体の動きが直接音楽になる。Miburi は肩、肘、手首等にセンサを内蔵している専用のウェアと、両手で演奏するグリップセンサ、そしてスピーカで成り立っている [3]。

しかし、これらの研究のうち幾つかはその後発展していない。原因としては、ユーザが仕組みを理解する必要があったり、練習をしなければ自分が奏でたい音や表現したい音が出せないからだと考えられる。また表現するために行う動作とそれによる効果が直感的でなかったり、日常生活における動作や操作と合っていないことも挙げられる。

以上の問題点から、Tangible Sound Object では、以下の項目を要件とする。

- 一定の空の空間
- 難しい操作を伴わない
- 直感的な操作
- 操作は日常の動作と関連するものである
- リアルタイム性
- ユーザの操作を邪魔しないデバイス

### 3. 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

#### 3.1 コンセプト

Tangible Sound Object は一定空間内で再生されている複数の音源をタッチパネル・スクリーンや光等の視覚的なインターフェースを使用せずにユーザ自らの手で物体として移動、配置が可能なタンジブルインターフェースである。Tangible Sound Object を使用することでユーザは音源 (音のオブジェクト) の形、サイズ、位置、距離をイメージできるようになると考える。Tangible Sound Object は、立体音響において近年取り入れられてきている音声オブジェクトをベースにしたミキシング方式“オブジェクトベース”の音響システムと、3次元での位置情報の取得が可能な位置情報センサーを組み合わせることにより、本来は物理的に

は触れることの出来ない音を物体として扱うことを可能とする。

Tangible Sound Object を体験するためには、ユーザは一定のスペースの中にいる必要がある。ユーザは自らの手で位置情報タグ、または位置情報タグが内蔵された物理的なオブジェクトを掴んで動かし、配置することにより音のオブジェクトを3次元に配置することができる。以下に主な Tangible Sound Object の操作の例を挙げる。

#### 3.1.1 任意の音をスペース内の任意の位置に配置する (図 2):

- (1) ライブラリから任意の音を選択
- (2) 選択した音が位置情報タグ (またはオブジェクト) の場所に再生される
- (3) 音 (位置情報タグまたはオブジェクト) を任意の位置に移動させる
- (4) 音 (位置情報タグまたはオブジェクト) を任意の位置に配置する

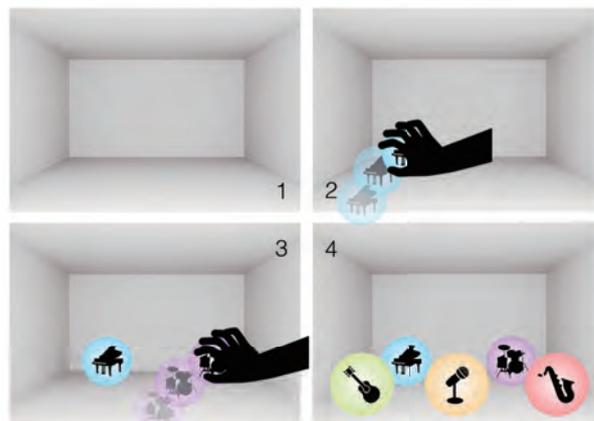


図 2 任意の音をスペース内の任意の位置に配置する

#### 3.1.2 再生されている音をスペース内の任意の位置に移動させる (図 3):

- (1) 動かしたい音 (位置情報タグまたはオブジェクト) を見つける
- (2) 音 (位置情報タグまたはオブジェクト) を掴む
- (3) 音 (位置情報タグまたはオブジェクト) を任意の位置に移動させる
- (4) 音 (位置情報タグまたはオブジェクト) を任意の位置に配置する

以上の例から分かる通り、Tangible Sound Object は音を物理的に空間内に配置することを可能にする。

#### 3.2 システム設計

Tangible Sound Object を実現するためには一定のスペース、音を再生するためのオブジェクトベースの音響システム、音のオブジェクトの位置を操作するための位置情

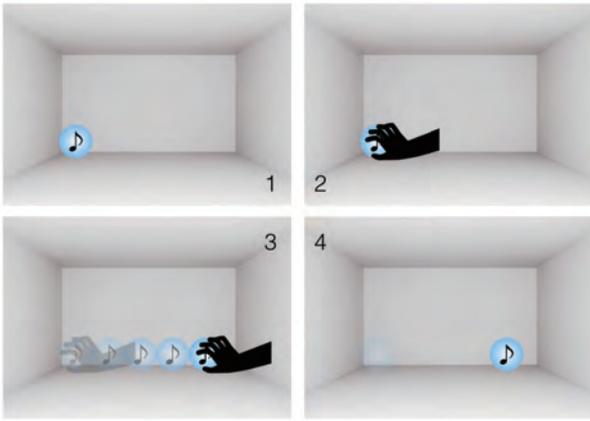


図 3 再生されている音をスペース内の任意の位置に移動させる

報センサ・タグが必要である。一定のスペースを実空間、また音の位置を指定するために仮想空間に用意し、タグの位置情報を取得するための位置情報センサを実空間に設置する。位置情報センサが取得したタグの3次元情報は仮想空間に送られる。仮想空間から音響システムに3次元位置情報を送ると指定した位置から音が再生される。位置情報の取得と音響システムへの3次元位置情報の送信は同時に行われているため、タグを動かすとタグに合わせて音源の再生の位置も移動する。音響システムは8つのスピーカー、パワーアンプリファイアー、4つの位置情報センサとタグ、MQTT ブローカー、必要なソフトウェアをインストールした Windows コンピュータで構成されている。

### 3.3 システム実装

Tangible Sound Object のシステムは以下のように実装した。

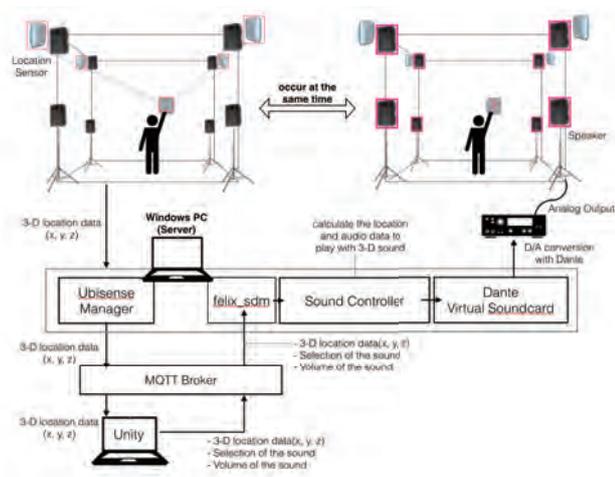


図 4 システム実装

各機能の説明を以下に示す。

**8つのスピーカー:** 立体音響を再生するためのスピーカーを一定空間の八隅に配置した。スピーカーは YAMAHA NS-B500 を使用した。

**パワーアンプリファイアー:** スピーカーから音を再生するために必要な機器。Dante Network と互換性のある YAMAHA XMV8280-D を使用した。

**ユビセンス 位置情報センサ:** 空間内で音のオブジェクトを移動、配置する為に使用した。部屋の四隅に設置した4つの位置情報センサ(図6)は UWB 無線で複数のタグ(図7の3次元位置情報を検知する(最大 80 回/秒)。管理は製造している株式会社ユビセンスが開発するマネージャを使用する [21]。図5は検知した3次元位置情報をマネージャから管理している様子である。

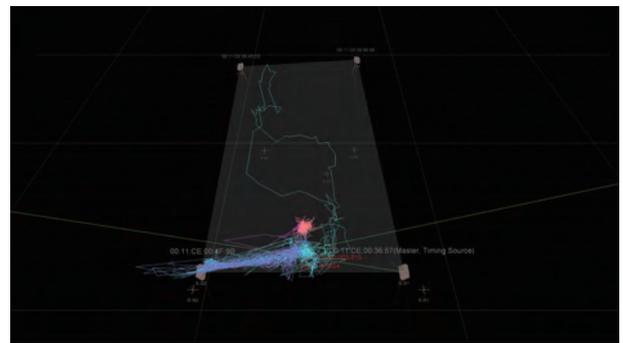


図 5 ユビセンスマネージャ: 検知したタグの軌跡



Source: Ubisense: Real-time location at a glance, 2016[22]

図 6 ユビセンス: 位置情報センサ

**felix\_SDM:** Software Defined Media が MQTT ブローカーと VSSS の間で MIDI ファイルと位置情報を変換するために製作したソフトウェアである。felix\_SDM は VSSS と TH-S に対応している。

**loopMIDI:** loopMIDI は複数の異なる MIDI 対応ソフトを接続できるようにする仮想 MIDI ポート作成ソフトウェアである。MIDI アウトプットと MIDI インプット



図 7 ユビセンス: タグ

が設定できるソフトと連携させることが可能である [9]。Tangible Sound Object では、felix\_midi と VSSS 間の接続で使用している。

**Virtual Soundscape System(VSSS):** VSSS とはバンダイナムコスタジオの開発する最先端の音響演出を再現・体感できるイベント及び施設向けの音響制御システムである。本システムは、バンダイナムコグループのゲーム製品で実際に使用されている音響制御のライブラリを応用した Windows 上で動作するアプリケーションである。ゲームに利用されるためプレイヤーの操作に応じて即時に反応するためのインタラクティブな技術を提供する [16]。

**Theater Surround(TH-S):** TH-S とはヤマハ株式会社の開発する任意音源の Panning アルゴリズムを組み込んだ立体音響システムである。本システムは、ヤマハ株式会社で開発された劇場向け映像移動処理を核とした Windows 上で動作するアプリケーションである。演劇やミュージカルの演出における使用を主な想定アプリケーションとして開発されているため、任意の入力音源をデザイナーの操作に応じて 3D 面内の任意の位置に定位させる技術を提供する [16]。

**Dante(Dante Virtual Soundcard):** Dante Virtual Soundcard はコンピュータを Dante 対応機器に変え、専用のハードウェアなしに標準イーサネットポートを通じて Dante オーディオトラフィックの送信および受信を可能にするアプリケーションソフトウェアである [1][17]。Tangible Sound Object では、felix\_SDM によって計算された立体音を 8 つのスピーカーから再生する際に使用される。

**Unity:** ユニティ・テクノロジーズによって開発された複数のプラットフォームに対応するゲームエンジンである [20]。Tangible Sound Object では、仮想空間の作成、ユーザの操作 (タグの位置) の情報を取り込み、felix\_SDM に位置情報を送信する際に使用される。

**MQTT ブローカー:** MQTT とは TCP/IP ネットワー

クで利用できる通信プロトコルの一つで、多数の主体の間で短いメッセージを頻繁に送受信する用途に向けた軽量なプロトコルである。Tangible Sound Object では、タグの位置情報、音源の情報、音源の再生位置、音源の音量等をやり取りする際に使用される。

以下の図 8、図 9 は Tangible Sound Object の音響システムを設置した図と、同じ部屋の 3D モデルを仮想空間上に用意したものである。



図 8 Tangible Sound Object の音響システム

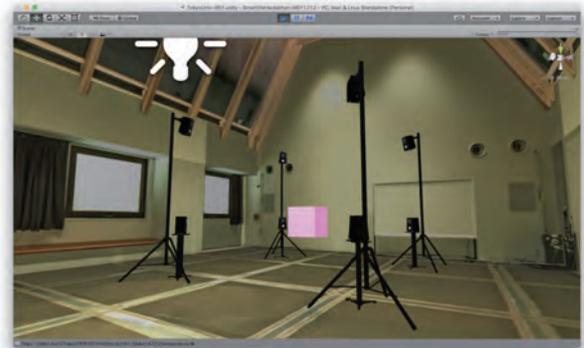


図 9 Unity: 部屋の 3D モデル

図 3.3 はユーザが実際に空間内の任意の位置に複数の音のオブジェクトを配置している様子である。各風船には位置情報タグが内蔵されている。

#### 4. 実験

第 3 章に述べたように、Tangible Sound Object は音をオブジェクトとして物理的に掴んだり配置することを可能にし、さらにユーザは音源 (音のオブジェクト) の形、サイズ、位置、距離をイメージできるようになると考えられる。この章ではまず予備実験として開発した Tangible Sound Object のシステムの評価を行い、そこから得られた結果をもとに本実験として Tangible Sound Object の評価を行った。



図 10 再生されている音をスペース内の任意の位置に移動させる

#### 4.1 予備実験: システムの評価

##### 4.1.1 目的

予備実験では、開発した Tangible Sound Object の音響システムを使って立体音響の検証を行った。被験者には開発したシステムから再生される複数のサンプル音源を聴いてもらい音のオブジェクトの大きさ (音量)、位置、距離について評価してもらった。複数の種類の音源を比較することにより、Tangible Sound Object に最も適する音源の特徴を把握し、本実験ではそれらの音源を使用した。評価項目は以下の通りである; 音の種類、音の長さ、音のオブジェクトの本来の大きさ (との比較)、音のオブジェクトの本来の高さ (との比較)、音のフォーマット (用意したサンプル音源の中には高さの表現を持たない音源も存在した)。

##### 4.1.2 設定

12名の被験者が参加した。予備実験は東京大学の I-REF 棟 6 階の Hilloby で行われ、音響システムは第 4 章に示したシステムを設置した。被験者は一定のスピーカーに囲まれたスペースの中心に立ち、音響システムから再生された音を聴いた後にワークシートの質問に答えてもらい、コメントをもらった。予備実験で使用した音源は以下の表 1 の通りである。全ての音源は二度以上再生され、一度目

表 1 音源の種類

No.	種類	名称	長さ	大きさ	高さ	フォーマット	高さの表現
1	効果音	蚊	連続	2cm	-	midi	○
2	効果音	犬	3秒	1m	30cm	midi	
3	効果音	ロボット (足音)	連続	10m	-	midi	
4	効果音	声 (会話)	5秒	150cm	150cm	midi	
5	効果音	花火	4秒	60m	100m	midi	○
6	効果音	歓声	6秒	-	-	midi	高さのみ
7	効果音	雨	連続	-	-	midi	高さのみ
8	音楽	女性の声 (歌)	3分	-	171cm	wav(録音)	○
9	音楽	ピアノ	3分	-	100cm	wav(録音)	○

は一定の位置で、二度目はある位置からある位置へ動く音とした。音はランダムな順番・位置で再生し、音源の選択・配置・移動はユニティから行った。

##### 4.1.2.1 質問は以下の通りである:

(1) 何の音が聴こえたか?

- (2) 音のオブジェクトの大きさははっきりしていたか? もしはっきりしていた場合、どの位の大きさだったか?
- (3) 音のオブジェクトの高さははっきりしていたか? もしはっきりしていた場合、どの位の高さだったか?
- (4) 音が聴こえた位置はどこだったか? (右、左、前、後ろ等)
- (5) 音の動きを追うことができたか? (10段階評価)

#### 4.2 結果と考察

予備実験の結果 (平均) は以下の表 2 の通りである。

表 2 予備実験の結果

No.	名称	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
1	蚊	正解	曖昧	曖昧	70%	6
2	犬	正解	1m	曖昧	70%	3
3	ロボット (足音)	正解	10m	10m	80%	8
4	声 (会話)	正解	曖昧 (大きい)	曖昧	50%	2
5	花火	正解	60m	100m(動いていた)	80%	8
6	歓声	正解	-	10m	-	-
7	雨	正解	-	-	-	-
8	女性の声 (歌)	正解	160cm	160cm	90%	7
9	ピアノ	正解	100cm	100cm	80%	6

以上の結果とコメント・フィードバックより、7つの観点から以下のように考察できた。

**音の種類:** 各音源はどの被験者にとっても何の音だったか非常に分かりやすかったが、音の表現の点で幾つかの問題が見られた。(例: 音量が音源ごとに違う、音源の音質の差、リバーブ)

**音の長さ:** 連続していない音源、特に犬、声 (会話) は音源が動いた際には追いきることが分かった。また、花火の音は連続してはいなかったが、音が下から上に長い距離を 4 秒かけて移動しており、その移動ははっきりと聞こえた。また女性の声 (歌) は歌が途切れる部分を除いては音を追うのに向いていた。

**音のサイズ:** 蚊、犬、ロボットのような実際の音源が小さいもの、または音源が一つであるものの音のサイズは曖昧で実際の音の大きさよりも大きく聴こえていた。声 (会話) の音源は非常にはっきりしていたが、実際の人の声とは違って聴こえていた。実際のサイズが大きく、環境音や複数のまとまった音源 (花火、歓声、雨) はとてもはっきりしており、リアルだった。

**音の高さ:** 花火の音源は実際の花火も下から上に移動する高さの表現がある為、音の高さを表現するのに最も適していた。他の音源で高さの表現を持つ蚊、歓声、女性の声 (歌)、ピアノは日常では高さの表現を持たないため、面白かった。

**音のフォーマット (質):** 女性の声 (歌) とピアノはとてもはっきり聴こえた。その 2 つの音源は実際にハイクオリティで録音されていた。

**環境音:** 雨や歓声などの環境音や周りを囲むような音は

非常にリアルだったが、スペースの中を移動させる音源としては向いていないことが分かった。環境音として使用したり他の音と組み合わせる事に向いている。

**音の位置・距離:** 環境音や周りを囲む音源は位置の特定はできなかった。それ以外の音源は特に止まっている時ははっきりとどこに位置しているか判断できた。ほとんどの被験者は音源が前、後ろ、右、左、斜め前、斜め後ろにある時は判断できた。上下の表現は比較対象があれば判断できた。移動している音は、正確ではないが判断できた。

以上より、連続していて、環境音のような周りを囲む音でない音源が Tangible Sound Object に適していると考えられた。

### 4.3 本実験: Tangible Sound Object の評価

#### 4.3.1 目的

本実験では、実際の Tangible Sound Object から得られる経験と有用性を検証した。被験者には第3章で述べた主な Tangible Sound Object の操作の例を実際に体験・評価してもらった。

#### 4.3.2 設定

12名の被験者が参加した。本実験は予備実験と同様に東京大学の I-REF 棟6階の Hiloby で行われ、音響システムは第4章に示したシステムを設置した。被験者は一定のスピーカーに囲まれたスペースの中に立ち、以下の2つの操作例を実際に体験してもらい、その後ワークシートで評価項目に10段階で答えてもらい、体験に対するフィードバックを体験全般・有用性・システムの観点からしてもらった。

- 任意の音をスペース内の任意の位置に配置する
- 再生されている音をスペース内の任意の位置に移動させる

本実験では2つまでの音源を同時に再生することが可能だった。被験者は、位置情報をタグを使い音のオブジェクトをスペース内で動かし、配置した。音源の選択は Unity と THS から行った。

評価項目は以下の通りである。

- (1) 音の聴こえ方はどうだったか？ (クオリティ、ノイズ、途切れなど)
- (2) 音のオブジェクトを動かした際の遅延はあったか？
- (3) 位置の精度はどうだったか？
- (4) 音の動きを追えたか？ (例: 音のオブジェクトを投げた時など)
- (5) 音を操作する際、オブジェクトとして捉えることができたか？

#### 4.3.3 結果と考察

本実験の結果は以下の表3の通りである。

以上の結果とフィードバックより、3つの観点から以下のように考察できた。

**Tangible Sound Object から得られる経験:** 本実験の

表3 Tangible Sound Object の評価 (平均値)

評価項目	平均値	最大値	最小値
評価項目1	7.6	10	4
評価項目2	8.4	10	5
評価項目3	8	10	6
評価項目4	8.4	10	5
評価項目5	7.8	10	2

結果、音のオブジェクトと位置情報を組み合わせたことで、音のオブジェクトを物理的に操作できるようになった。被験者は初めて音を物体として捉えられ、また何名かの被験者は“音を掴む”という新しい経験ができた。また Tangible Sound Object の持つリアルタイム性は、再生されている音をリアルタイムで前後左右に動かす、また、日常では動き得ない音を動かす、など新しい表現を可能にしたことから、今後新しい表現方法として音を使うことができると期待できる。今後の展望としては、2つ以上の複数の音のオブジェクトを同時に再生する、音の向きの表現の追加、音のオブジェクトのサイズの変更、音源に対する音響効果の追加、任意の音を簡単に再生できるインターフェースの開発、音響効果によって一定のスペースの広さを操作する等が挙げられた。一方で、立体音響を再生する際に音の演出の部分で問題点が見つかった。まず、音のオブジェクトが一定の空間の中央に位置した時と、スピーカーよりも外にオブジェクトが位置した時のユーザと音のオブジェクトとの距離が上手く認識できなかった。これらに対しては実際の音と再現した音を比べて調整する等、音響システムの演出の調整が必要であると考えられる。

**Tangible Sound Object の有用性:** 音のオブジェクトを物体として捉え、ユーザが自らの手で動かし配置できるようになったことで、様々な場面、特にライブ・コンサートや劇場、映画館、お化け屋敷、美術館、スポーツの試合、美術などのエンターテインメントの演出、また遠隔会議、遠隔医療、オンライン講義等でも活用できることが期待される。今後は Tangible Sound Object の特徴である“リアルタイム性”をどのように活かせるかが課題となる。

**Tangible Sound Object のシステムの問題点:** システムの開発により音のオブジェクトを物理的に操作することができるようになったが、解決すべき問題が幾つか残った。現在のシステムでは、音を操作する際にたまたま遅延が起こる。また、位置情報センサとタグとの間に障害物があった時に、正しく位置情報を取得できない問題がある。また現在のシステムを別の環境下に移した際はその環境に合わせた調整・設備が必要になる。

## 5. まとめ

本来、音は目に見えないものであり、触ることも不可能である。我々の日常生活において“音”は常に耳に入ってくるものであり、通常音はスピーカー、イヤホン、楽器、日常の動作、環境、自然物から発されている。本研究は、立体音を位置情報と組み合わせて物理的なオブジェクトとして扱えるようにしたことで我々が普段耳にしている音に対して新しい観点から音を使えることを示した。ユーザは視覚的なインターフェースなしに、自らの手で音のオブジェクトを実際の空間でリアルタイムに移動、配置することができるようになった。本研究では“音を掴む”、“音を投げる”、“浮いている音”といった今まででは考えられない新しい音の表現も可能にしたことで、今後 Tangible Sound Object をライブエンタテインメントや教育の分野などで新しい表現方法として使えるようになることが期待される。

### 参考文献

- [1] Audinate. Dante overview. <https://www.audinate.com/solutions/dante-overview>, 2015. December 2015.
- [2] Music Technology Group Universitat Pompeu Fabra Barcelona. Reactable - genesis of the project. <http://mtg.upf.edu/project/reactable>, 2015. December 2015.
- [3] Yamaha Corporation. Miburi. <http://www.yamaha.co.jp/design/products/1990/miburi/>, 2015. December 2015.
- [4] Yamaha Corporation. Tenori-on. <http://europe.yamaha.com/en/products/musical-instruments/entertainment/tenori-on/>, 2015. December 2015.
- [5] Inc. Dolby Laboratories. A short history of cinema sound. <http://blog.dolby.com/2013/10/short-history-cinema-sound/>, 2013.10.18. February 2016.
- [6] Inc. Dolby Laboratories. Dolby atmos: Why object-based audio matters. <http://blog.dolby.com/2014/09/dolby-atmos-object-based-audio-matters/>, 2014. December 2015.
- [7] Inc. Dolby Laboratories. Dolby atmos. <http://www.dolby.com/us/en/brands/dolby-atmos.html>, 2015. December 2015.
- [8] Inc. DTS. Dts. <http://dts.com/dtsx>, 2016. April 2016.
- [9] Tobias Erichsen. loopmidi. <http://www.tobias-erichsen.de/software/loopmidi.html>, 2015. December 2015.
- [10] Hiroshi Ishii. Tangible bits: beyond pixels. In *Proceedings of the 2nd international conference on Tangible and embedded interaction*, pp. xv–xxv. ACM, 2008.
- [11] Hiroshi Ishii, HR Fletcher, J Lee, S Choo, J Berzowska, C Wisneski, C Cano, A Hernandez, and C Bulthaupt. Musicbottles. In *ACM SIGGRAPH 99 Conference abstracts and applications*, p. 174. ACM, 1999.
- [12] Hiroshi Ishii, Ali Mazalek, and Jay Lee. Bottles as a minimal interface to access digital information. In *CHI'01 extended abstracts on Human factors in computing systems*, pp. 187–188. ACM, 2001.
- [13] Sergi Jordà, Günter Geiger, Marcos Alonso, and Martin Kaltenbrunner. The reactable: exploring the synergy between live music performance and tabletop tangible interfaces. In *Proceedings of the 1st international conference on Tangible and embedded interaction*, pp. 139–146. ACM, 2007.
- [14] Paradiso Joseph Marrin Teresa. The digital baton: a versatile performance instrument. In *The Digital Baton: a Versatile Performance Instrument*, pp. 313–316. International Computer Music Conference, 1990.
- [15] Software Defined Media. Software defined media. <http://sdm.wide.ad.jp/>, 2015. January 2016.
- [16] SDM Working Group Member. Software defined media. In *Software Defined Media*. WIDE, 2015.
- [17] Mileruntech. Dante. <http://www.milenetwork.com/library/dante.html>, 2015. December 2015.
- [18] WIDE Project. Wide project. <http://sdm.wide.ad.jp/>, 2016.
- [19] Soundlocus. Arnis sound technologies. <http://www.soundlocus.com/>, 2015. December 2015.
- [20] Unity Technologies. Unity. <http://unity3d.com/jp/>, 2015. December 2015.
- [21] Ubisense. Ubisense. <http://ubisense.net/>, 2015. January 2016.
- [22] Ubisense. Ubisense: Real-time location at a glance. <http://ubisense.net/en/products/rtils-platform>, February 2016.
- [23] Theremin World. Theremin world. <http://www.thereminworld.com/>, 2005. December 2015.
- [24] 鹿喰善明. 講演 スーパーハイビジョンの研究開発とロンドンオリンピック (技研公開 2012 講演・研究発表 特集号 (2)). NHK 技研 R&D, No. 135, pp. 30–43, 2012.