

令和 6 年 5 月 28 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K11956

研究課題名(和文) リモート合唱システムとコロナ収束後の超合唱システムへの発展及びデータベースの公開

研究課題名(英文) Remote Chorus System and Its Post-Pandemic Evolution into a Super Chorus System and Database Release

研究代表者

高橋 弘太 (TAKAHASHI, Kota)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号：10188005

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：コロナ禍の中で、リモート合唱の必要性が増したが、舞台上の合唱に匹敵するレベルの合唱作品をリモート合唱で作成することは困難であった。本研究では、リモート合唱における機材の問題や、歌唱者の問題を定量的かつ統計的に解析し、リモート合唱であっても舞台上の合唱に匹敵する作品を生成する信号処理技術を開発した。さらに、その延長として、舞台上の合唱を超える超合唱を実現するための技術的基盤も開発した。あわせて、合唱作品をミキシングする技術の研究に取り組む研究者のために、歌唱者ごとに分離した合唱音声データベース SIS-DB を構築し、フリーアクセス可能な状態でインターネット上にリリースした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義としては、第一に、リモート合唱における時間ずれが、システム由来の時間ずれと、歌唱者由来の時間ずれに分解して解析できることを示し、さらに、歌唱者由来のずれは、混合ガウス型分布でモデル化できることを示した点である。第二に、周波数方向に個別の高調波成分を移動させる技術を開発した点である。第三に、時間周波数平面の局所領域でのエントロピーを指標にすることで歌唱者間の混合の調和を評価することが可能であることを示した点である。社会的意義としては、リモート合唱を支える技術を今のうちに進歩させておくことで、この次に来るかもしれないパンデミックに備えることができるという点をあげることができる。

研究成果の概要(英文)：Amid the coronavirus pandemic, the need for remote chorus has increased, but it has been difficult to create choral works comparable to on-stage chorus using remote chorus. We have developed a signal processing technology that quantitatively and statistically analyzes singers' problems and generates works that are comparable to on-stage chorus even in remote chorus. We have also developed a technological foundation to realize super choruses that exceed the above. At the same time, for researchers working on technology for mixing choral works, we constructed a choral audio database, SIS-DB, separated by singer, and released it on the Internet for free access.

研究分野：信号処理工学

キーワード：リモート合唱 時間周波数平面

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2020年に始まったコロナ禍により、世界中の合唱団体は大きな影響を受けた。例えば、2020年3月、オランダのアムステルダム合唱団で新型コロナウイルスの集団感染が発生し、演奏会に出演した130名のうち102名が発症し4名が命を落とした。このショッキングなニュース等により世界中の合唱団が活動停止に追い込まれた。そこで登場したのがリモート合唱である。リモート合唱は、歌唱者ごとに個別に録音を行うため、感染の危険性はきわめて少ない。しかし、合唱者同士で歌唱音を聴き合うことができないなどの理由で合唱作品として高い完成度を有する作品を実現することはきわめて困難であった。そこで、リモート合唱であっても、舞台上の合唱に匹敵する合唱作品を作成できる信号処理技術の誕生が求められていた。

また、合唱の研究を行う研究者用の音源が、国内外ともほとんど存在しないという問題もあった。本来、合唱というものは舞台上で歌唱者全員が対面で同時に発音を行うものであるため、歌唱者単独の音源に限定すると、研究者が広く利用できる音源を入手することはきわめて困難であった。

2. 研究の目的

本研究の第一の目的は、合唱を行う人が満足できるリモート合唱システムの構築である。この目的を達成するために、現在のリモート合唱では何が問題であるかを定量的に洗い出す。第二の目的は、舞台上に歌唱者が立って歌う従来の合唱をも超える合唱を実現することである。これらの目的を実現するための新しい信号処理手法を開発する。

本研究の第三の目的は、歌唱音声を音源とする音楽データベースを構築し公開することで、合唱や歌唱を研究する研究者に音源データを自由に使うことである。これによって合唱や歌唱を対象とした工学的研究や心理音響的研究が盛んになることを目指す。

3. 研究の方法

研究には、歌唱者ごとに分離した歌唱音源の音ファイルを膨大な数準備する必要がある。我々は、合唱者から構成される団体の協力を得て、表1に示すように音源の採取を行った。

採取した音源は、器楽曲3曲とジングルを含めて、合計13曲で、延べ人数は475名となった。これらの音源を我々の開発するミキシングプログラムでミキシングして作品を作成する過程で3つの新聞社に記事としてとりあげていただいた。表1にはそれらの掲載時期についても記載してある。

研究は、これらの音源を対象に独自の信号処理テクニックを開発していくという方法で行った。研究の具体的内容としては、第一に、時間軸調整と発話タイミングずれの研究、第二に、周波数軸方向の移動手法の開発、第三に、調和感の向上のための研究、第四に、適応的残響付加法の研究がある。また、本課題の成果としてリリースする音楽データベースについては、利用者にとって使いやすいものにするため、以上の研究で得られた技術を随時反映させて構築していった。

表1 収集した合唱曲音源と新聞における紹介記事。
収集した音源は、すべて歌唱者ごとに分離した音源である。

日付	活動	楽曲	人数 [人]
2020/06/30	朝日新聞にて紹介	-	-
2020/07/26	公明新聞にて紹介	-	-
2020/09/09	テレビ東京「WBS」にて紹介	「恋音と雨空」	11
2020/09/20	「Harmorearth」 「機械 vs 人間」プロジェクト	「心の瞳」	18
2020/09/24	エイバックス「合唱のアソビバ」	「はじまりのとき」	6
2021/01/02	FM福岡 ジングルミキシング	(ジングル)	16
2021/03/29	「Harmorearth」初演プロジェクト	「音楽である私」	41
		「音楽がぼくに囁いた」	38
2021/03/31	YouTubeチャンネル「あされん」コラボ	「旅立ちの日に」	33
2021/03/31	FM福岡「50周年記念特番」	「時代」	170
2021/04/20	中学生によるリモート吹奏楽	「ルパン三世」	21
		「美女と野獣」	26
		「宝島」	26
2021/06/15	「デジタルTEPIA」出展	「大地讃頌」	5
2021/08/17	読売新聞にて紹介	-	-
2021/10/31	FM福岡「九州ゴスペルフェスティバル2021 in 博多」	「OH HAPPY DAY」	64

4. 研究成果

(1) 時間軸調整と発話タイミングずれの研究

図1に示すリモート合唱の歌唱音声収録システムを前提に実験を行った。歌唱者は、指揮者の動画を見て歌唱を行い、録音用機材で録音を行う。リモート合唱においては、多数の参加者が参加できることに価値を求める意見が多いため、必然的に

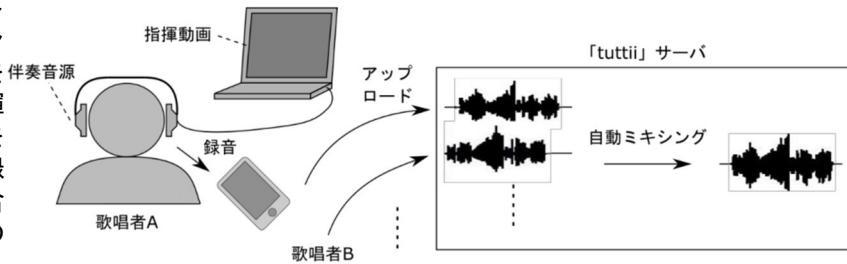


図1. 本研究で想定しているリモート合唱の構成図。

プロの録音技術者が録音に立ち会うことはできず、歌唱者それぞれが利用できる範囲の機材で合唱に参加することとなる。本研究を開始する以前においては、歌唱者間の時間ずれ、歌唱者と伴奏の時間ずれが大きく、舞台上での合唱に比較して完成度の低い作品がほとんどであった。

我々は、この時間ずれを解析し、ずれは2つの要因に大別できることを明らかにした。第一のずれは、「システム由来のずれ」である。これは、指揮動画が、伴奏音とはずれた時間で再生されることや、録音デバイスのクロック周波数のばらつきなど、機材に起因するずれである。我々は、このずれに対処するために、マーク信号と呼ぶ独自の信号を開発し、この信号を歌唱者の前後に収録することで、時間軸の一致を実現することを試みた。これによってシステム由来のずれの統計的性質が明らかになっただけでなく、極端に大きな時間ずれは解消することができた。しかし、それでもなお、歌唱者の歌唱のオンセットを解析すると時間ずれが存在していた。これを我々は「歌唱者由来のずれ」と称し、その特性について解析した。なお、リモート合唱における時間ずれを「システム由来のずれ」と「歌唱者由来のずれ」に分解して解析する考え方は、本課題独自のものである。

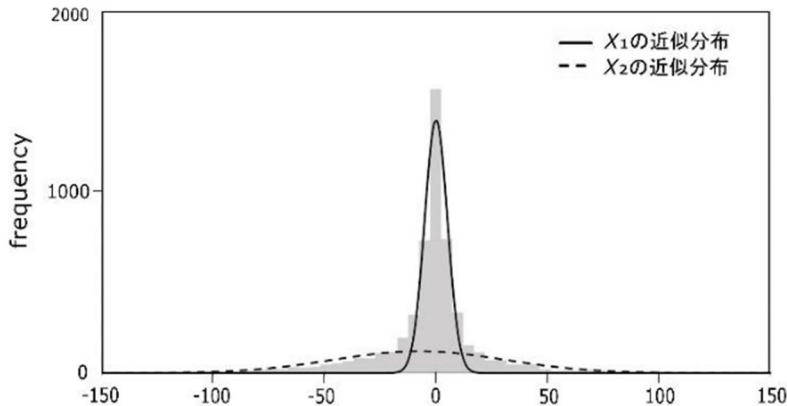


図2. 歌唱者由来の時間ずれの分布は混合ガウス型分布となった。

その解析の結果を図2に示す。本研究により、歌唱者由来のずれは、混合ガウス型で良く近似できることがわかった。この混合ガウス分布を構成する2つのガウス分布は、第一のガウス分布X1が標準偏差5msであり、第二のガウス分布X2が標準偏差38msであった。また、その混合比は、3:2であった。一方、舞台上の合唱においては、歌唱者は互いの声をリアルタイムで聴取して随時調整を行うため、特に第二のガウス分布に相当する時間ずれは生じにくく

くなる。よって、第二のガウス分布を構成する歌唱者に対して時間補正を行うことで、リモート合唱を舞台上の合唱に近づけることができ、さらに第一のガウス分布に相当する時間ずれを時間補正することで超合唱に近づけるのではないかと考えることができた。なお、リモート合唱の歌唱者由来の時間ずれを混合ガウス型分布でモデル化するという方法は本課題独自のものである。

(2) 周波数軸方向の移動手法の開発

以上は時間軸方向での調整であるが、周波数軸方向での調整についても研究を進めた。合唱は高調波成分同士が重畳することによって発生するうなりが、合唱らしい心地よさを醸し出す一因にもなっていると

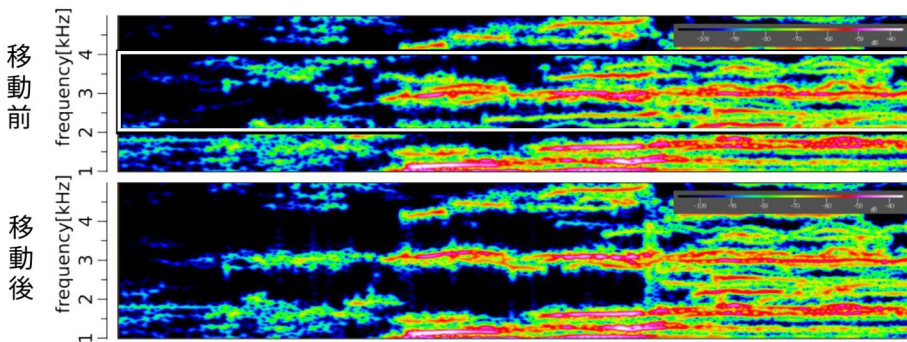


図3. 周波数軸方向移動のデモンストレーション。上図が移動前で下が移動後。白枠内を移動した。

の考えがある。舞

台上においては、歌唱者同士が、高調波の周波数をごく僅かに調整して、このよりの周波数や強度を制御することも可能であるが、リモート合唱においては、この制御を歌唱者が実施するのは不可能である。また、歌唱信号などについてピッチを調整する既存のツール(いわゆるプラグインなど)も存在するが、例えば第5次の高調波であれば、ピッチの調整の誤差は5倍に拡大するため、ピッチの調整では十分な制御を行うことはできない。よって、高調波を直接制御する技術が求められる。そこで、図3のように時間周波数平面において特定の高調波を移動する技術を開発し、歌唱に用いることで聴取者が知覚する合唱の音質を制御できることを実証した。

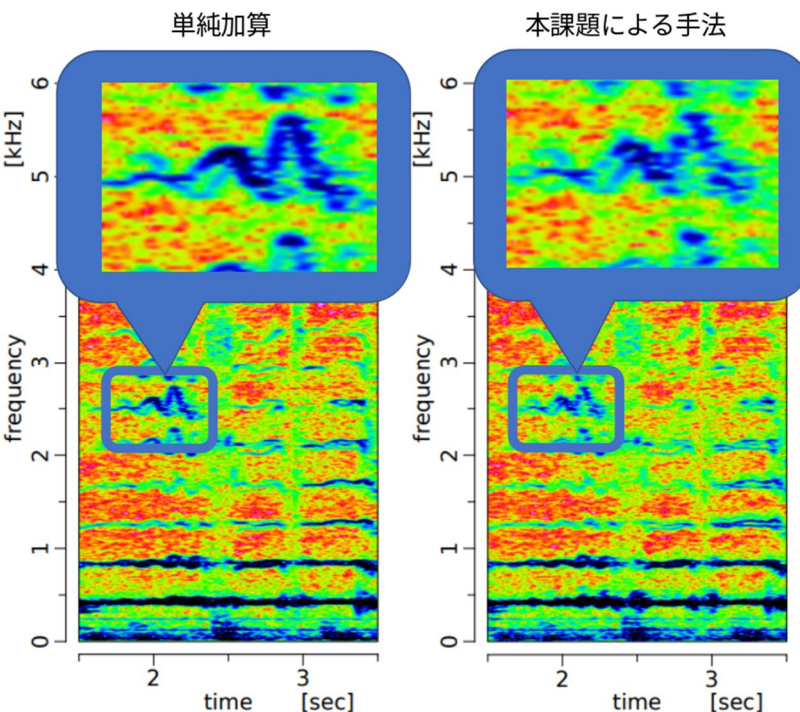


図4. 調和感向上のための信号処理のデモンストレーション.

(3) 調和感の向上のための研究

聴取実験の結果、以上に示した「時間軸方向に移動するという微調整」と「周波数軸方向に移動するという微調整」を行ってもなお、歌唱者間の歌唱音声が舞台上での歌唱音声のときのように調和しない音源が存在した。そこで、我々は、時間周波数平面での局所領域での時系列としてのエントロピーを指標とする手法に取り組んだ。具体的には、時間周波数平面上の局所領域において各歌唱者の強度が均等になるようにゲインマスクをかけることで、エントロピーは上昇し、結果として時間周波数平面において、どの歌唱者も突出せず、お互いに干渉して、あるときは、適切なうなりを生じ、合唱ならではの味わいを生じさせることができると考えた。図4に本手法の説明のための実験結果を示す。状況を単純に説明するために、この例では歌唱者をあえて2名としている。左側は従来法である単純加算による結果であり、右側が強度差が小さくなりエントロピーが大きくなるように時間周波数平面でゲインマスクをかけた本手法の結果である。図の時間周波数平面表示は、ゲインマスクをかけた後、いったん時系列に戻し再度短時間FFTによって解析を行った図である。拡大した部分において、単純加算では1人のスペクトルが支配的であるが、本課題による手法では、2人のスペクトルが対等に加算されており、ごく微小な周波数差によりうなりも発生しており、調和のとれた状態と聞き取らせられる可能性が示されている。歌唱者間の音量を全周波数・全時間区間にわたって一括して調整した場合、ある局所領域においてこのような調和をとることはできるが、別の局所領域での調和とは両立しない。よって、このような局所的ゲインマスクによる調整が有効なのである。

(4) 適応的残響付加法の研究

リモート合唱においては、歌唱者ごとに異なる音響空間で収録を行うため、単独歌唱音源に付加されている残響の大きさや残響の質が異なる。これらを加算した場合、上で書いたような「時間軸上での調整」「周波数軸上での調整」「時間周波数平面における局所領域での調整」を行ったとしても、作品において特定の歌唱音が分離して聞こえてしまうという現象が生じる。これに対処するため、適応的残響付加法の研究に取り組み、具体的には、E値を指標とする提案法1と、部分ラウドネスを指標とする提案法2を実装し、その長所と短所を比較した。

(5) 研究者用音楽データベース

研究用に収集した歌唱音源の一部を研究者用に公開した。本課題の成果としてリリースしたデータベースは、名称を「セパレート音源型音楽データベース」と名付けた。略称は、「SIS-DB」である。

SIS-DBでは、OH HAPPY DAY という曲のアルト、メゾソプラノ、ソプラノの3つのパートを64名の歌唱者が歌唱しており、それぞれの独立音源が収録されている。研究者は、これらの音源を自由にダウンロードして自らの研究に用いることができる。音楽音響分野の研究として合唱のミキシングに取り組む研究者がひとりでも増え、研究分野として活発になれば、SIS-DBを公開した意義があると考えている。

図5にセパレート音源型音楽データベース SIS-DB のトップページのスクリーンショットを掲載しておく。

セパレート音源型音楽データベース

このページの説明

SIS-DB

ミキシングのアルゴリズムの研究や、音楽合奏のモデル化の研究を行うためには、クロストークの無いセパレート音源の音楽データベースが必要となります。特に、声楽については、過去にそのようなものは存在しませんでした。そこで、ミキシングの研究者自身が作った研究用データベースが、セパレート音源型音楽データベース SIS-DB です。

このページは、SIS-DB のダウンロードページです。表内の各ファイルは、Microsoft WAVE形式 (.wav ファイル) にて提供しております。また、一括ダウンロード用のファイルは、ZIP形式にて圧縮してあります。音声データは、すべて PCM 48,000 Hz 24bit に変換してありますが、収録時のフォーマットはファイルにより異なります。チャンネル数は、モノラル(1ch)となっております。

音声の試聴とダウンロード

1. アマチュア歌唱者による「OH HAPPY DAY」のリモート合唱

リモート合唱については [こちら](#) をご覧ください。

				
	アルト	メゾソプラノ	ソプラノ	同形式一括ダウンロード
(収録時) WAVE/48 kHz/16 bit (変換後) WAVE/48 kHz/24 bit	<input type="button" value="選択"/>	<input type="button" value="選択"/>	<input type="button" value="選択"/>	この行をダウンロード
(収録時) WAVE/44.1 kHz/16 bit (変換後) WAVE/48 kHz/24 bit	<input type="button" value="選択"/>	<input type="button" value="選択"/>	<input type="button" value="選択"/>	この行をダウンロード
(収録時) AAC/48 kHz (変換後) WAVE/48 kHz/24 bit	<input type="button" value="選択"/>	<input type="button" value="選択"/>	<input type="button" value="選択"/>	この行をダウンロード
(収録時) AAC/44.1 kHz (変換後) WAVE/48 kHz/24 bit	-	-	<input type="button" value="選択"/>	この行をダウンロード
(収録時) AAC/16 kHz (変換後) WAVE/48 kHz/24 bit	-	-	<input type="button" value="選択"/>	この行をダウンロード
(収録時) MP3/44.1 kHz (変換後) WAVE/48 kHz/24 bit	<input type="button" value="選択"/>	<input type="button" value="選択"/>	<input type="button" value="選択"/>	この行をダウンロード
同パート一括ダウンロード	この列をダウンロード	この列をダウンロード	この列をダウンロード	全一括ダウンロード (約1.6GB)

2. プロ歌唱者2名ずつによる「OH HAPPY DAY」のパート別歌唱

				
	アルト	メゾソプラノ	ソプラノ	一括ダウンロード
(収録時) WAVE/48 kHz/24 bit 無変換	ダウンロード	ダウンロード	ダウンロード	一括ダウンロード (約85MB)

テキストのダウンロード

データセット 1 から 2 の音楽データに関して、楽譜データおよび収録時の詳細なファイルフォーマットはこちらでご覧になれます。

PDFデータ	「OH HAPPY DAY」楽譜
PDFデータ	収録時のファイルフォーマット

録音条件と機材

音楽データ 1 から 2

音楽データ 1 から 2 は、FM福岡主催の音楽イベント「九州コスベルフェスティバル2021」の一環として収録されたものである。音楽データ 1 は、下記に示す、リモート合唱の録音条件に基づいて録音された。

- 録音場所：雑音の少ない一般住宅の室内を基本とした。
- 録音機材：参加者が所持するスマホ等の端末に搭載された、簡易的な録音アプリ(「ボイスメモ」(iOS)、「PCM録音」など)
- 録音方法：参加者は端末を2台用意し、一方の端末で伴奏、ガイドボーカルが含まれるプロ歌唱者の歌唱動画を再生した。音声の聴取はヘッドフォンにより行った。参加者は、この動画にタイミングを合わせて歌唱し、もう一方の端末で歌声を録音した。
なお、動画の冒頭には、各音源の時間軸を揃えるための目印として電子音を挿入した。参加者は、歌唱を始めるときに録音端末をヘッドフォンに近づけ、この電子音を録音した。
- 録音後の処理：相互相関関数により、録音された電子音の時刻を特定し、その時刻をもとに各音源の時間軸を揃えた。ただし、音源によっては手動で時間軸を推定し調整したものも存在する。詳細は「収録時のファイルフォーマット」を参照のこと。

なお、音楽データ 2 は、リモート合唱のガイドボーカルとして使用されたものである。

著作権等に関する注意

音声、音楽の研究の進展のため、あるいは、信号処理技術の発展に寄与するためであれば、広く利用を許可したいと思います。ぜひ、企業や大学での研究で、素材として使って頂ければと思います。また、学会発表、展示会発表などにおいて、本データを信号処理したもの、あわせて、比較のために本データそのものを参加者に聴かせることは可能です。新製品や新技術や技術改良の効果を具体的にアピールするために、本素材と本素材をその技術で処理した結果の音声を発表(学会、展示会、Webページに掲載、CDとして配布)することも許可したいと思います。どうぞ、技術の進歩のために有効にお使いになって下さい。

公序良俗に反する利用を禁じます。本データベースに掲載する録音の演奏者の皆様は、音声、音楽研究の進展のためになることを理解して協力して下さっていますので、演奏して下さった方々に迷惑がかかるような行為があった場合は、必要な処置をとらせて頂きます。

義務ではありませんが、本データベースの録音を利用したものを発表・配布する場合は、「音楽・声楽用セパレート音源型データベース (SIS-DB) を利用した」もしくは、「SIS-DB を利用した」ことを書き添えて頂ければ幸いです。定期的に「SIS-DB」でWeb検索し、本データベースが期待どおりに皆さんに活用して頂いていることがわかれば、今後、さらに充実したものにしていきたいと考えております。

謝辞

音楽データ 1 と 2 の音源収集に関しまして、ITエンジニアグループ「Harmorearth (ハモラス)」の方々、FM福岡の方々に多大なるご協力を頂きました。ここに、御礼申し上げます。また、本データベースの意義にご理解頂き、音源の公開を許可して下さった歌手グループ「VOJA-tension (ヴォジャテンション)」の方々、「九州コスベルフェスティバル2021」参加者の方々に感謝いたします。

図 5. セパレート音源型音楽データベースのトップページ。
誰でも合唱のためのミキシングの研究に取り組むことができる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 大西恭子, 高橋弘太
2. 発表標題 リモート合唱の調和感を向上させるためのミキシング法と評価
3. 学会等名 日本音響学会音楽音響研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 東 栄伸, 高橋 弘太
2. 発表標題 リモート合唱の一体感を高める高調波周波数変更の研究
3. 学会等名 日本音響学会音楽音響研究会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 太田 晴紀, 高橋 弘太
2. 発表標題 スパース表現を用いた成分選択によるリモート合唱音源の混合
3. 学会等名 電子情報通信学会 応用音響研究会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 中内優, 高橋弘太
2. 発表標題 部分ラウドネスを指標とする適応的残響付加法
3. 学会等名 応用音響/電気音響 (EA) 研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 五反田聖矢, 大澤暁 (Harmorearth), 音森一輝 (Harmorearth), 高橋 弘太
2. 発表標題 リモート合唱の音混合における音声時間軸の自動調整と発声タイミングずれの評価
3. 学会等名 日本音響学会音楽音響研究会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

セバレート音源型音楽データベース (SIS-DB) http://www.it.cei.uec.ac.jp/SIS-DB/
--

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関