

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：32601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H04228

研究課題名（和文）アクティブ音響センシングによる表面センサ化技術の確立とその応用

研究課題名（英文）Establishment and application of surface sensing technology by active acoustic sensing

研究代表者

伊藤 雄一（Itoh, Yuichi）

青山学院大学・理工学部・教授

研究者番号：40359857

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、物体表面に音響信号を伝搬させ、その変化を学習することによって物体表面上に置かれたモノの位置、種類や状態、モノに対するインタラクションを取得する、アクティブ音響センシング技術の確立を目指す。自らが音響信号を発する音響アクティブマーカを実装し、その位置をセンシングする手法として、信号の到達時間差を用いる手法と信号の減衰を用いる手法の2つを検討した。結果、前者は平均誤差は3.79cm、標準偏差は2.25cmとなった。後者ではその平均誤差は0.29cmで十分小さかった。さらに同じサーフェス上に4つの物体が同時に配置された場合でも推定誤差は1.82cmと十分小さな誤差が実現できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

全てのモノや人がIoT技術によってつながるSociety5.0実現のためには、人やモノの状態をサイバー空間に取り込む技術の確立が必須である。このような技術を用い、特に人の身の回りに存在するモノの空間内における位置や状態、使用状況といった多面的な情報を短期的（あるタイミングにおける人-モノ-空間の位置関係や相互作用）あるいは長期的（人-モノ-空間の位置関係の変遷や相互作用の変遷、状況変化）に収集・解析することによって、人の状態や活動状況の認識、その変化を捉えることができれば、人-モノ-空間のインタラクションを通じて人の理解が可能となり、人の生活をより豊かにする情報技術の発展が期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we aim to establish active acoustic sensing technology that conveys acoustic signals across an object's surface and learns their alterations to determine the position, type, and state of items placed on the surface, as well as interactions with those items. We implemented an acoustic active marker that emits acoustic signals, and considered two methods for sensing its location: one utilizing the difference in signal arrival time and another using signal attenuation. The results showed that the former method resulted in a mean error of 3.79 cm and a standard deviation of 2.25 cm. The latter method, however, achieved a sufficiently small mean error of 0.29 cm. Moreover, even when four objects were simultaneously placed on the same surface, the estimation error was sufficiently small, at 1.82 cm.

研究分野：ヒューマンコンピュータインタラクション

キーワード：ヒューマンインタフェース アクティブ音響センシング サーフェス

### 1. 研究開始当初の背景

全てのモノや人が IoT 技術によってつながる Society5.0 実現のためには、人やモノの状態をサイバー空間に取り込む技術の確立が必須である。実空間内のモノを認識する技術では、特に画像処理技術を用いた日常空間に存在するモノの位置認識などが進展してきた[Paul, 2001]。さらに Deep Learning に代表される人工知能 (AI) 技術によって、モノの種類推定なども可能になりつつある[Girshick, 2014]。一方、加速度センサや光センサ、ジャイロセンサや圧力センサといった様々なセンサを用いて、モノの種類だけではなく、その位置や使用方法までコンピュータに認識させる技術に注目が集まっている[Yeo, 2016]。このような技術を用い、特に人の身の回りに存在するモノの空間内における位置や状態、使用状況といった多面的な情報を短期的 (あるタイミングにおける人-モノ-空間の位置関係や相互作用) あるいは長期的 (人-モノ-空間の位置関係の変遷や相互作用の変遷、状況変化) に収集・解析することによって、人の状態や活動状況の認識、その変化を捉えることができれば、人-モノ-空間のインタラクションを通じた人の理解が可能となり、人の生活をより豊かにする情報技術の発展が期待できる。一方で、このような実生活における情報取得技術の実応用に向けては様々な課題がある。例えばカメラによるモノの情報取得においては、生活環境におけるプライバシーの問題や、モノ同士が重なると認識できないというオクルージョンの問題、さらに暗い環境では使えないという環境依存性の問題がある。また、映像伝送はネットワーク帯域を多く占有し、その解析にもコンピュータのリソースを多く必要とするリソースコストの問題や、複数のカメラを用いる際にはネットワークインフラ整備の必要性などマネーコストの問題がある。

そこで本研究では、人-モノ-空間のインタラクションの短期的・長期的な低コストでの取得をいかに実現するか、さらにその技術を用いて取得されたデータをもとに、どのような応用が考えられるかを研究課題の核心をなす学術的な問いとする。

### 2. 研究の目的

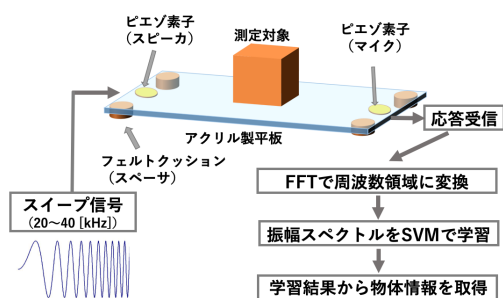


図1 パネル上の物体識別プロトタイプ概要

上で述べた問いを解決するために、本研究では物体表面に音響信号を伝搬させ、その変化を学習することによって物体表面上に置かれたモノの位置、種類や状態、モノに対するインタラクションを取得する、アクティブ音響センシングを用いた物体表面センサ化とその応用技術の確立を目指す。我々はこれまで、図1に示すように、複数の Piezoelectric 素子をマイクとスピーカとして貼り付けたアクリルパネルに超音波域の音響信号を伝搬させ、パネル上に配置した物体による音響信号の変化を機械学習 (Support Vector Machine) によって識

別するシステムを実装し、検討を進めてきた。このシステムによるパネル上の単一物体 (26 種類) の識別率として 98.9% を実現した。また、複数物体が同時に存在する際の識別では、物体の全ての組み合わせを学習する必要があるという組み合わせ爆発の問題があるが、我々は、それぞれの物体  $i (0 \leq i \leq n)$  (ただし  $i = 0$  は何も存在しない状態) を一つだけ配置した際に得られる音響信号データを  $U_i$  とすると、 $n$  個の物体が同時に置かれた状態の音響信号  $U$  は、振動の運動方程式から  $U = \sum_{i=1}^n U_i - (n-1)U_0$  (1) で表されることを導出し[特願 2018-030678]、実際にこの式から算出された音響信号によって学習した識別器によって、3 つまでの複数物体識別を最大 98.3% で実現した。しかしながら、パネルの温度変化による識別率への影響や、位置認識技術の未確立、ハードウェアそのものの検討といった問題が存在し、これらを解決することでアクティブ音響センシングによる物体表面のセンサ化技術の確立を目指す。具体的には机上の既存物体に音響マーカとなる薄型スピーカを貼り付け、特定の周波数の音響信号を発生し、それを解析することで物体位置の取得を試みる。

### 3. 研究の方法

本研究では、手軽に机上の既存物体をコンピュータで認識する手法として、物体に音響マーカとなる薄型スピーカを貼付することを提案する。音響マーカとなる特定の周波数の音響信号を物体ごとに割り当てたスピーカから発生し、物体が置かれているサーフェスをセンシング面とし、その面上に貼付したマイクで応答を検知する。その後、伝搬してきた音響信号を解析し、サーフェス上の物体の種類と位置を判別する。ここで、音響信号を解析し、マーカを貼付した物体の位置を推定することは、マーカから発される音響信号の音源定位をすることと同義である。音源定位の手法として一般的なものでは TdoA 測位[西浦, 2000]が挙げられる。これは複数マイクで音響信号をセンシングし、各マイクへの音響信号の到達時間差から音源定位を図るものである。しか

しこの手法は、その空間分解能がオーディオハードウェアのサンプリングレートに依存する欠点がある。そのため、一般に数 cm 単位で音源定位するには計測に 1 MHz 以上のサンプリングレートが必要である場合が多い。そのため計測機器であるオーディオデバイスには高いハードウェア性能が求められ、日常での机サイズといった狭い範囲でのセンシングには適さない。そこで、サンプリングレートといったオーディオハードウェアの性能に依存せず、狭い範囲でのセンシングを可能にする手法として、本研究では音響の高周波数成分が距離に応じて減衰する特性を利用したアクティブ音響センシングを新たに提案・検討する。この手法は空間分解能が測定機器のサンプリングレートに依存しない為、TdoA 測位の問題点を解決できると考えられる。

#### 4. 研究成果

##### (1) 実装システム

###### ① 概要

図 2 に音響マーカを用いたセンシングの概念図を示す。本システムは、物体に貼付する音響マーカ部と、マーカから発せられた音響信号をセンシングし解析する部分で構成される。

音響マーカとは、物体ごとに割り当てた異なる周波数の超音波を発する薄型のスピーカのことである。

この物体は、サーフェスに接触した際に音響信号が物質を通してサーフェスに伝搬する。

このサーフェス上に伝わる音響信号を、Fast Fourier Transform (FFT) を用いて周波数領域に変換することで周波数特性を解析する。その後、各物体に割り当てた周波数のパワースペクトルを計算し、事前に定めた一定値以上であるかどうかで、サーフェスにどの物体が置かれているかを識別する。そして、得られた周波数特性をコンピュータを用いて解析し、(2)節で述べる手法を用い、その配置物体の位置を推定する。

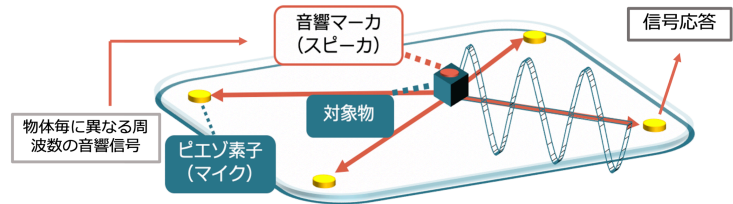


図 2 音響マーカを用いたセンシング概念図

###### ② プロトタイプ実装

音響マーカとして本研究では直径 21 mm、厚さ 0.3 mm のバイモルフ式ピエゾ素子を用いた。バイモルフ式のピエゾ素子は、ユニモルフ式のピエゾ素子に比べ振動が強力であり、物体を十分に振動させるにはバイモルフ構造の方が良いとされている。サーフェスにも同様のピエゾ素子をマイクとして、それぞれ接着剤(コクヨ社のひつつき虫:品番 380N)を用いて取り付けた。この接着剤は何度でも簡単に取り付け可能であり、本システムは剛体であれば全ての物体やサーフェスに適用可能である。しかし一般的にピエゾ素子が生成できる電圧は非常に小さく、そのまま信号解析に用いることができないため、信号を増幅する必要がある。したがってマイクとなるピエゾ素子と計測機器の間に、オペアンプを用い非反転増幅回路を作成し、それらを接続した。オペアンプには新日本無線社製の SOT-23 を用い、増幅回路には村田製作所社製の静電容量が 0.1  $\mu$  F である積層セラミックコンデンサを用いた。ただし、アンプを用い信号を増幅する場合、アンプに入力される信号に既にノイズが含まれる場合、そのノイズも増幅してしまう。そのため、本研究ではノイズ対策のために、作成した増幅回路とマイク間の配線の長さをできるだけ短くした。また同様の理由でグラウンドに接続する配線は太いものが望ましい。そのため、グラウンドに接続する配線には協和ハーモネット社製の導体外径が 0.48 mm と絶縁電線を用了。伝搬する音響信号に対し、信号の減衰を用いる手法を用い実験を行う際は、計測機器に、TASCAM 社製の USB オーディオインタフェース (US-16x08) を用いサンプリングレート 96 kHz で測定した。図 3 にオーディオインタフェースを用いて実装したプロトタイプの全体図を示す。また信号の到達時間差を用いる手法を用い実験を行う際は、計測機器にトレンツ社製の高速データ収集装置 (Cosmo-Z Mini) を用いサンプリングレート 1 MHz で測定した。これはこの手法が大きなサンプリングレートを要するからである。実際、物体中の音響信号は約 3 km/s 程であるため、前述の USB オーディオインタフェースを測定機器として用い、サンプリングレート 96 kHz で測定を行なった場合、測定時の 1 Hz あたりの距離分解能は  $3 \text{ km/s} \div 96 \text{ kHz} = 3.125 \text{ cm/Hz}$  となる。したがってこの場合、原理的に 3.125cm 以下の精度では位置推定を行えない。このことを考慮し、サンプリングレート 1 MHz で測定を行える高速データ収集装置 (Cosmo-Z Mini) を用いた。測定された信号は、いずれの手法の場合もコンピュータ (MacBook Pro, CPU: Intel Core i5 1.4GHz) へ送信し、解析を行った。なお、

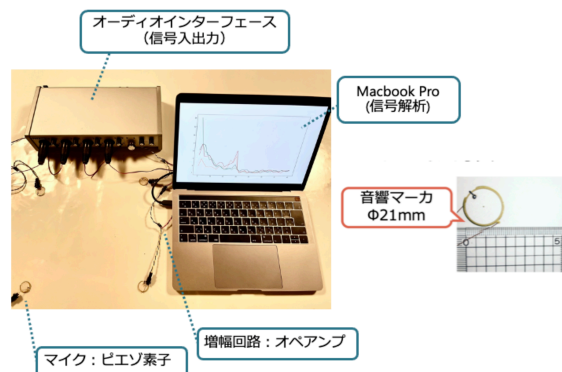


図 3 ハードウェア詳細



解析ソフトウェアはPythonを用いて作成した。

## (2) センシング原理

### ① 信号の到達時間差を用いる手法

音がマイクアレイで測定されると、音源から各マイクまでには伝搬経路差があるため、複数のマイクで測定された音響信号間には、信号に到達時間差が発生する。この到達時間差を求める最も基本的な方法として、相互相関 (Cross-Correlation:CC)法が挙げられる。CC法では、各マイクで計測された音響信号を時間方向に1サンプルずつスライドして相互相関係数を求める。この相互相関係数は、各マイクで計測された信号の信号の類似度を示す指標であり、この相互相関係数が最大となる時のサンプルの時間差が、各マイクへの音響信号の到達時間の差を示す。しかし、この方法は、単一の音源を前提としており、サーフェス上に複数音源がある場合には信号同士が干渉し、適用できない課題が存在する。

そこで、本研究では、得られた音響信号をウェーブレット変換することにより、周波数毎に到達時間を算出する。ウェーブレット変換とは周波数解析手法の一種であり、フーリエ変換によって周波数特性を求める際に失われる時間領域の情報を、この変換においては残すことが可能である。信号の時間領域を失わずに周波数解析する手法としては、他に短時間フーリエ変換 (Short-Time Fourier Transform:STFT)やウィグナー分布 (Wigner distribution function:WDF)を用いた変換が考えられるが、ウェーブレット変換は計算が高速である点で優れている。

### ② 信号の減衰を用いる手法

音響信号は高い周波数ほど、距離による減衰が大きいという特徴を有する。これは音響信号が媒質による伸縮作用によって伝搬する際に、熱が生じることでエネルギーを消費し、この吸収減衰によるエネルギーの損失が、周波数が高いほど大きくなるからである。本項ではこの特性を利用した音源定位手法を提案する。まず、音響マーカーから低周波数と高周波数の正弦波を含む合成波を発生する。物体からサーフェスへ伝搬する音響信号は、マイクと音源の距離が大きくなるにつれ、音響信号の高周波成分ほど減衰が大きくなる。よって、図4に示すようにマイクと音源の距離が大きくなるにつれ、サーフェスへ伝搬した音響信号の低周波成分と高周波成分のパワースペクトルの差が増大する。このことから、音響マーカーから発する音響信号の低周波成分と高周波成分のパワースペクトルの差を特徴量とし、機械学習を用いて回帰分析することで物体位置を推定できると考えられる。

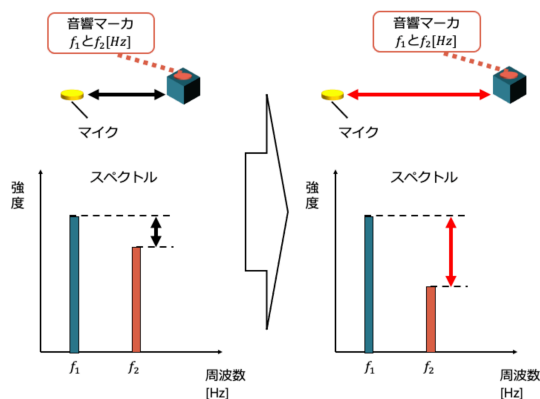


図4 マイクと音源の距離によるスペクトル変化

## (3) 評価実験

### ① 信号の到達時間差を用いる手法の評価

#### ・概要・手順

評価実験として各マイクへの音響信号の到達時間差から、マーカーを貼付した物体位置を推定し、その誤差を用いて提案手法を評価する。本実験の実験環境について述べる。図5に示すようにサーフェスとなる木製の机に、20 cm×20 cmのセンシング範囲を設定した。マイクとなるピエゾ素子はそのセンシング範囲の四隅から物体1つ分(2 cm)離して貼付した。これは四隅の座標に物体を配置した際にマイクに直接物体が触れ合わないようにする為である。本実験ではマーカーを貼付する物体としてレゴブロック(3 cm×3 cm×3 cm)を採用し、図5に示す5cm刻みの座標、計25位置に物体を置き、各20回音源を発生し、位置推定した。スピーカから流す超音波は周波数5k Hzの正弦波を用い、到達時間の算出方法として、各周波数の最大強度の70%を閾値とし、その閾値を超えた時間を到達時間とした。4つのマイクでそれぞれ音響信号の到達時間を算出し、到達時間差から位置推定を行なった。

#### ・結果

結果として平均誤差は3.79cm、標準偏差は2.25cmとなった。

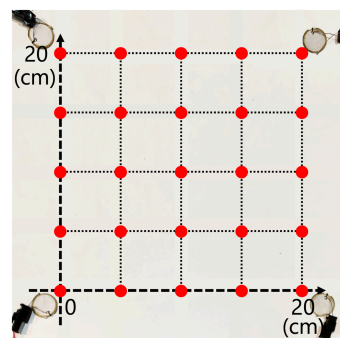


図5 物体座標

表1 各座標毎の平均絶対誤差(cm)

x座標 \ y座標	0	5	10	15	20
0	2.34	1.01	7.88	3.81	4.55
5	5.77	1.39	1.85	5.23	2.47
10	7.32	1.54	0.74	7.06	6.90
15	3.93	1.27	6.79	2.01	3.74
20	2.54	2.86	3.21	5.94	2.63

表 1 に各座標での平均誤差を示す。最も誤差が大きかったのは座標 (10, 0) の 7.88cm で、最も誤差が小さかったのは座標 (10, 10) の 0.74cm であった。また標準偏差は 2.25cm であることや、表 1 に示す誤差の最大値と最小値が大きく、推定位置のばらつきが大きかった。

#### ②信号の減衰差を用いる手法の評価

##### ・概要・手順

本実験の実験環境について述べる。(3)①の実験環境と同じように、図 5 に示すようにサーフェスとなる木製の机に、20 cm×20 cm のセンシング範囲を設定した。マイクとなるピエゾ素子はそのセンシング範囲の四隅から物体 1 つ分 (2 cm) 離して貼付した。マーカを貼付する物体も同じレゴブロック (3 cm×3 cm×3 cm) を採用し、図 5 に示す 25 位置に物体を置き、物体認識を行った。スピーカから流す音響信号は周波数 5k, 6k, ... 39k, 40k Hz の合成波を用い、各座標位置で 40 回ずつ音を発し計測を行なった。解析は予備実験の結果、精度の良かったランダムフォレストを用い x 軸, y 軸をそれぞれで学習し、位置推定を行った。

##### ・結果

表 2 に計測データを 5 分割交差検証し、得られた結果を示す。x 軸において、決定係数が 0.996、二乗平均平方根誤差が 0.66 cm、平均絶対誤差が 0.29 cm となった。

また、y 軸において、決定係数が 0.996、二乗平均平方根誤差が 0.63 cm、平均絶対誤差が 0.29 cm となった。

また実測値と推定値を図 6 に示す。物体位置による誤差のばらつきなどは見られず、どの位置でも高い精度で位置推定できていることが確認できる。

表 2 減衰差を用いた手法の位置推定誤差

	$R^2$	RMSE(cm)	MAE(cm)
x 軸	0.99	0.66	0.29
y 軸	0.99	0.63	0.29

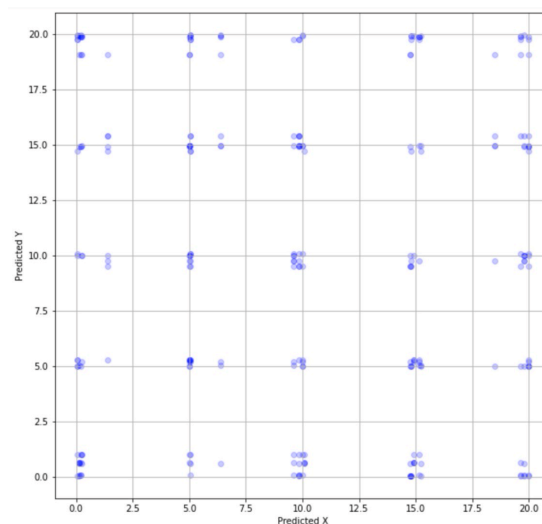


図 6 減衰差を用いた手法の実測値と推定値

#### (4) 考察

##### ①信号の到達時間差を用いる手法

この実験において、物体の半径が 1.5cm であることを考慮すると、平均誤差は 3.79cm という値は大きい値である。この原因として、各マイクで音の到達時間が正しく測定できていないことが考えられる。このばらつきの差により各マイクでの到達時間差が正しく計算できていない可能性が考えられる。このばらつきが生じる原因としては、各マイク感度のばらつきや、ウェーブレット変換で音響信号を周波数・時間領域に変換する際に、パワースペクトルの立ち上がりの傾きに影響を与えるからであると考えられる。これを解決する方法として、ウェーブレット変換などを用いずに元の音響信号のまま、到達時間を計算する方法が考えられる。しかしこの手法は、音源が 1 つであることが前提であり、音源が複数あると、各音響信号が干渉し、正しく計算できない課題があり、更なる検証が必要である。

##### ②信号の減衰差を用いる手法

この実験において、果 x 軸方向, y 軸方向ともに平均絶対誤差が 0.29cm であることは、二次元に換算すると誤差  $0.29 \times \sqrt{2} \approx 0.41$ cm である。この誤差が生じた原因としては、物体自身の大きさによるものであると考えられる。今回は音源位置を物体の中心と考えた。しかし実際は音響マーカから物体を通じ、サーフェスへ伝搬するため、物体の中心から音が伝搬するかは不明である。また、この実験で得られた結果から、信号の減衰差を用いる手法の方が、到達時間差を用いる手法よりも、高い精度で位置推定できることがわかった。これは関連研究[Yilei, 2020]と比べても十分に小さな値であり、提案手法の有用性を確認できた。

##### (5) おわりに

本研究では、音響マーカによる物体とのインタラクション手法を提案し、プロトタイプを製作した。実装したプロトタイプは、オーディオインタフェースやピエゾ素子から構成され、物体やサーフェスにピエゾ素子を貼付するだけで身近なものを手軽にタンジブル化できる。物体とのインタラクションの内、本研究では特に物体の種類と位置に着目し、それらを推定するシステムを作成し、評価実験を通してその精度を確認し、関連研究と比較しても十分小さい誤差値を得ることができ、提案手法の有用性を確認した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 川崎 祐太、伊藤 雄一、藤田 和之、尾上 孝雄	4. 巻 62
2. 論文標題 アクティブ音響センシングにおける環境温度変化にロバストな物体情報識別手法の検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 情報処理学会論文誌	6. 最初と最後の頁 1658 ~ 1668
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20729/00213193	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 上田 将理、藤田 和之、伊藤 雄一	4. 巻 23
2. 論文標題 PlanT：植物の成長制御を用いた積算情報可視化ディスプレイ	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ヒューマンインタフェース学会論文誌	6. 最初と最後の頁 407 ~ 418
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11184/his.23.4_407	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 鈴永 紗也、藤田 和之、白井 僚、伊藤 雄一	4. 巻 26
2. 論文標題 CoiLED Display：対象に巻きつけ可能なストライプ状フレキシブルディスプレイ	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本バーチャルリアリティ学会論文誌	6. 最初と最後の頁 230 ~ 240
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18974/tvrsj.26.4_230	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 川崎祐太、伊藤雄一、藤田和之、尾上孝雄	4. 巻 22
2. 論文標題 アクティブ音響センシングを用いた物体情報識別における環境温度変化に関する一検討	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ヒューマンインタフェース学会研究会研究報告集	6. 最初と最後の頁 55-60
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究分担者	杉浦 裕太  (Sugiura Yuta)  (40725967)	慶應義塾大学・理工学部(矢上)・准教授   (32612)	
研究分担者	高嶋 和毅  (Takashima Kazuki)  (60533461)	東北大学・電気通信研究所・准教授   (11301)	

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
---------	---------