

# 機器トラブルの電話サポート支援のための 可聴音を用いた情報通信手法の提案

三宅 真由<sup>†</sup> 繢木 太翔<sup>†</sup> 川上 善大<sup>††</sup> 松田 裕貴<sup>†</sup>

† 岡山大学 〒700-0082 岡山県岡山市北区津島中3丁目1-1

†† 株式会社カワカミ 〒719-0241 岡山県浅口市鴨方町小坂東566

E-mail: †{mayu.miyake, taiga.tsuzuki}@cocolab.jp, yukimat@okayama-u.ac.jp,

‡yoshihiro.kawakami@kawakami.tech

あらまし 食品加工機器メーカーでは、顧客先に設置された機器のトラブル対応を電話で行っているが、機器構造が複雑なため、顧客とオペレータ間で確認箇所や位置関係を正確に共有することが難しい。また、顧客先によってはインターネット通信が利用できず、サポートが長時間化するという課題がある。そこで本研究では、既存の電話回線で送受信される可聴音に信号を重畠し、遠隔地の機器の特定箇所を顧客に提示する「可聴音通信」に基づく支援システムを提案する。本稿では通信方式の設計とメーカー内での事前実験を行い、提案手法により安定した情報通信および情報提示が可能であることを確認した。

キーワード カスタマーサポート、電話サポート、業務支援、認識共有支援、音通信、電話回線

## An Audible Sound-Based Communication Method over Telephone Lines for Supporting Troubleshooting of Equipment Failures

Mayu MIYAKE<sup>†</sup>, Taiga TSUZUKI<sup>†</sup>, Yoshihiro KAWAKAMI<sup>††</sup>, and Yuki MATSUDA<sup>†</sup>

† Okayama University Tsushima-naka 3-1-1, Kita-ku, Okayama, Okayama 700-0082, Japan

†† Kawakami K.K. Kosaka Higashi 566, Kamogata-cho, Asakuchi, Okayama 719-0241, Japan

E-mail: †{mayu.miyake, taiga.tsuzuki}@cocolab.jp, yukimat@okayama-u.ac.jp,

‡yoshihiro.kawakami@kawakami.tech

**Abstract** Manufacturers of food processing equipment provide telephone-based support for troubleshooting machines installed at customer sites. However, due to the complex structure of the equipment, it is difficult for customers and operators to accurately share inspection points and spatial relationships. In addition, some customer sites lack Internet connectivity, which results in prolonged support sessions. To address these issues, this study proposes a support system based on audible-sound communication, in which signals are superimposed on audible sounds transmitted over existing telephone lines to indicate specific locations on remotely installed equipment. This paper presents the design of the communication scheme and preliminary experiments conducted within the manufacturing company, confirming that the proposed method enables stable information communication and intuitive information provisioning.

**Key words** Customer support, Telephone support, Business support, Shared understanding support, Audio communication, Telephone lines

### 1. はじめに

現在、多くの企業では顧客からの問い合わせやトラブルに対応するため、電話によるサポート業務が行われている。乾麺の

結束機や計量機の開発・メンテナンスを行うカワカミ社<sup>(注1)</sup>においても、機器の故障対応やトラブルシュート、部品の発注確認などを電話を介して実施している。しかし、同社が展開する機器は構造が複雑であり、類似した形状・大きさの部品が数多

(注1) : <https://kawakami.tech/>

く存在する。そのため、電話によるトラブルシュートでは口頭での情報共有に限界があり、誤認や手戻りが発生しやすいという課題が存在する。

電話を介したトラブルシュート時に頻出する問題として、(1)基本情報共有の問題、(2)初期位置共有の問題、(3)対象物位置共有の問題の三点が挙げられる。まず基本情報共有の問題は、トラブルシュート開始前に顧客が使用している製品の型番を把握できない場合である。型番の記載箇所が分からないと、問題の特定に時間を要したり、誤った操作案内につながる恐れがある。次に初期位置共有の問題は、電話越しでは顧客が機器をどの位置から見ているのか把握できない点である。オペレーターが顧客の視点を正確に認識できない場合、指示の内容や方向を誤る可能性がある。最後に対象物位置共有の問題は、指示された箇所をオペレータまたは顧客が正しく特定できない状況である。これは部品名称の理解不足や型番の誤認、さらには初期位置共有の不一致により探索範囲を誤ることで発生する。これら三つの課題は相互に影響し合い、結果として電話サポートの長時間化を招いている。

加えて、結束機や計量機を使用する多くの製麺所は山間部に位置しており、インターネット回線が整備されていない場合も多い。そのため、ネットワークを用いたビデオ通話などの高度なコミュニケーション手段を利用することは困難である。

そこで本研究では、既存の電話回線のみを利用し、現行の電話サポートで多くの時間を要している、(2)初期位置共有の問題、および(3)対象物位置共有の問題の解決を目的とする。具体的には、可聴音域の信号を用いた音響通信により、遠隔地(顧客側)の結束機・計量機上の特定箇所を指示する技術を提案する(図1)。オペレーターが操作箇所を示す信号音を送信し、顧客側では電話回線を通じて受信した音から信号を抽出し、対応する箇所を光や音で提示する仕組みを構築する。

本稿では、可聴音通信方式の設計を行うとともに、メーカー内の事前実験を通じて提案手法の有効性を検証した。実験の結果、機器の稼働音などのノイズが存在する環境下においても、提案手法が安定した情報通信を実現できることを確認した。

## 2. 関連研究

### 2.1 音でデータを送る技術に関する研究

阿部らは、人間の耳に聞こえにくい周波数をスマートフォンで送受信することでシニアカーと自転車の接近検出手法を提案している[1]。渡邊らは、超音波を発する小型スピーカとマイクを使用し音量の変化やドップラー効果を利用して、ユーザの行動、周囲に居る人、現在居る場所などの情報を取得し音声記録に埋め込む手法を提案している[2]。森勢らは、モスキート音を用いることで音楽に知覚的な影響を与える歌詞やアーティストなどの情報を埋め込み、音楽と一緒に情報をリアルタイムで抽出する技術を提案している[3]。Suzukiらは、動画の注釈情報を人間に聞こえにくい高周波の音声信号に変換し、ビデオカメラの近くに設置したスマートフォンから録画中に動画へ埋め込むことで動画編集を容易にする技術を紹介している[4]。Ahnら

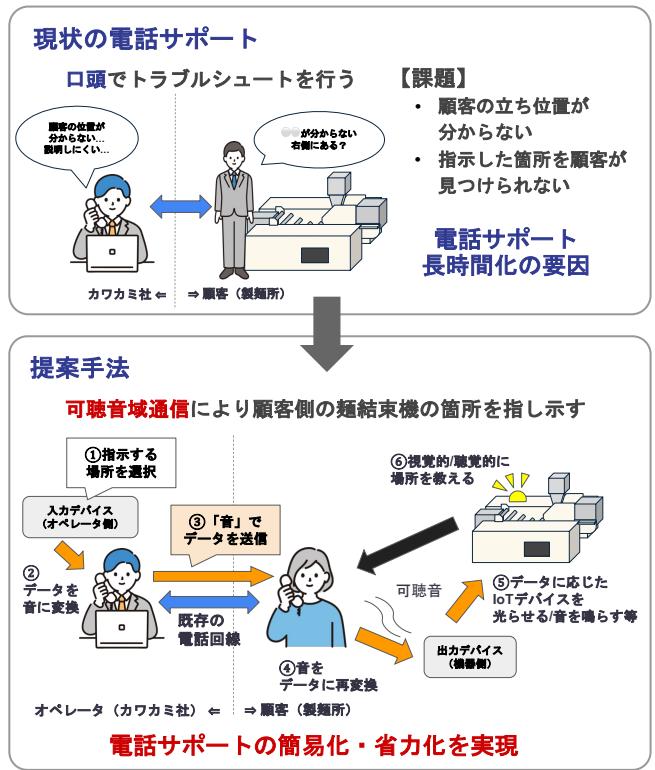


図1: 研究の全体像

は、非可聴周波数を使用することでインターネットを利用せず、ロボット間で通信を行う技術を開発している[5]。Katzschmanらは水中で音通信を利用してロボットを操作することで、遠隔で海洋生物を観察する手法を開発している[6]。Yangらは、音声通話中のDTMF(Dual-Tone Multi-Frequency)トーンをIoT制御コマンドとして利用する遠隔制御システム「DTMFTalk」を提案している[7]。人間に聞こえる周波数帯のトーン信号を用いることで、インターネット環境が限定される状況でも安定した遠隔操作を可能とし、音情報通信の有効性を示している。

岡野らは、非可聴周波数帯に信号を重畠することに加え、送受信データに情報理論的助長性を持たせる通信方式を確立することで、ロバスト性を確保する手法を提案をしている[8]。複数回送受信を行うことで、騒音環境下と静寂環境下で共に99%を超える認識率を確認し、伝搬耐性を備えることを実験的に示している。

### 2.2 本研究の位置付け

本研究で使用する従来の電話回線は会話の主要な部分を伝達することが目的であるため、伝達できる周波数帯域には制限(標準音質・ナローバンド: 300Hz~3.4kHz, 高音質・ワイドバンド: 100Hz~7kHz)がある。非可聴音域の音は使用できない場合がある。加えて、人間には聞こえにくい高周波数帯を用いることは会話の妨げにならないが、データ送信の挙動が分かりにくい(いつデータが送られているのかが分からない)ため、オペレーターと顧客の間での状況認識の共有が難しくなる可能性がある。そこで本研究では、データ送信に可聴音域を使用することで、オペレーターと顧客が通信状況を把握しやすく、電話回線を用いたデータ送信が可能な情報通信手法の実現を目指す。

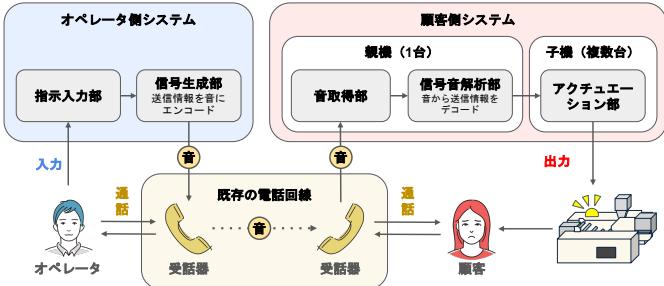


図 2: システム構成



図 3: オペレータ入力デバイス画面（実験用画面）

### 3. 提案手法

#### 3.1 手法の概要

本稿で提案する可聴音を用いた電話回線を介する情報通信手法の全体像を図 1 に示す。流れとしては、まずオペレータが指示したい機器の箇所を入力デバイスから選択し、そのデータを音に変換し既存の電話回線を介して信号音を顧客に伝える。次に顧客側では受話器から流れてくる信号音を受信しデータに再変換する。最後に機器に設置した IoT デバイスをデータに応じて光らせたり音を鳴らすことで、視覚的・聴覚的にオペレータが指示した場所に誘導する。システム構成は図 2 に示すとおり、オペレータ側システム（指示入力部・信号生成部）および顧客側システム（音取得部・信号音解析部・アクチュエーション部）で構成される。顧客側システムは信号音を受信しデータに再変換する親機とデータに応じて光らせたり音を鳴らす子機があり、子機は機器の指示したい場所に貼り付けて使用する。以降では各構成要素について詳細を述べる。

#### 3.2 オペレータ側システム

オペレータ側システムは、PC 等で動作し、機器の操作信号を「音」に変換し再生するシステムである（図 3）。このシステムは、Python (Version 3.13.5) と PyQt6 などを用いて開発しており、GUI 上で各ビット列信号を選択することにより、対応する周波数成分から合成された音波を再生することができる。

##### 3.2.1 指示入力部

指示入力部は、オペレータが機器の特定箇所を指示できるようにするインターフェースである。オペレータは顧客との会話中に、このインターフェース上で操作対象のアクチュエータを選択することで、本手法での通信内容を決定する。なお、図 3 は実験用に各種設定・確認ができるような UI を備えているが、実

開始信号	パリティビット	操作対象のアクチュエータ情報①	操作対象のアクチュエータ情報②	操作対象のアクチュエータ情報③
信号: 受信開始信号	パリティビット(0)	0	1	1
1481Hz	1481Hz	1481Hz	1975Hz	1975Hz
音: +	→	+	+	+
2468Hz	1975Hz	1975Hz	2468Hz	2468Hz
(0.9秒)	(間隔)	(0.9秒)	(間隔)	(0.9秒)

図 4: 信号音の構成とその例（ID3 を送る場合）

表 1: 周波数の組み合わせ

意味	周波数 1 (音名)	周波数 2 (音名)
受信開始信号	1481 Hz (F#)	2468 Hz (D#)
0	1481 Hz (F#)	1975 Hz (H)
1	1975 Hz (H)	2468 Hz (D#)

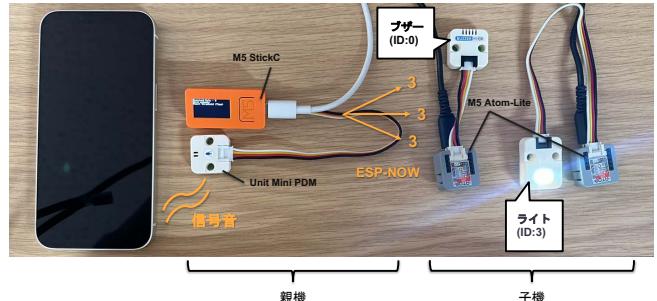


図 5: 顧客側デバイス

際にオペレータが使用するインターフェースはそれらを除外したシンプルな UI となることを想定する。

##### 3.2.2 信号生成部

信号生成部では、指示入力部で決定された通信内容をエンコードするとともに、そのデータを電話回線を介して送る「信号音」の生成を行う。この信号音は、図 4 に示す通り、信号音解析部で信号音の開始を認識させるための「受信開始信号」と、誤り検出を行うための「パリティビット」（本稿では偶数パリティ）、指示入力部で指定した「操作対象のアクチュエータ情報」（本稿では 3bit 分）で構成される。信号音は先頭から「受信開始信号」、「パリティビット」、「操作対象のアクチュエータ情報」の順で送信する。

各信号について、それぞれ 2 つの周波数の音を割り当てることで「信号音」を生成する。特に製麿所では機器の動作音や工場の環境音が発生している可能性があるため、顧客側の環境に存在するノイズの影響や信号の誤認識を低減するために、1 つの信号に 2 つの周波数を割り当てるとした。なお、これらの合音に使用する周波数の組み合わせは表 1 の通りであり、人が聴いた際にも不快にならないような「和音」となるように設定した。各信号音は一定の長さ・間隔（本稿ではそれぞれ 0.9 秒、0.1 秒）で合成される。

#### 3.3 顧客側システム

顧客側システムは図 5 に示す、電話回線を通じて伝達された信号音を受信・解析する「親機デバイス」、機器に取り付けユーザに対して情報提示を行う「子機デバイス」からなるシステムである。「親機デバイス」は、外付けマイク（Unit Mini PDM<sup>(注2)</sup>）

を接続した M5 StickC<sup>(注3)</sup>を使用し、信号音の受信や解析、「子機」との通信を行う。Unit Mini PDM と M5StickC は、GROVE 相互ケーブルを用いて接続されており、取得したデータを随時操作できる。「子機デバイス」は、M5 Atom-Lite<sup>(注4)</sup>を使用し、これに顧客に機器の特定箇所を指示するためのアクチュエータを接続する。具体的には、ブザー（Unit Buzzer<sup>(注5)</sup>）、またはライト（Unit FlashLight<sup>(注6)</sup>）を GROVE 相互ケーブルで接続することで使用する。

### 3.3.1 音取得部・信号音解析部（親機デバイス）

音取得部では、電話回線を介して届いた顧客側受話器の音を取得し、周波数解析を行う。FFT は 10Hz の周期で行い、周波数の音量を 250 Hz から 4000 Hz までを 250 Hz 間隔で算出する。

信号音解析部では、信号音を分離・解析することにより「操作対象のアクチュエータ情報」を抽出する。手順は下に示すとおりである。

- (1) 音取得部で得た FFT 結果から「受信開始信号」に対応する周波数の音量が 0.6 秒間閾値以上であるかを判定し信号の開始を検出する。
- (2) 信号の開始が確認された場合、0.4 秒間隔を空けてから「パリティビット」と「操作対象のアクチュエータ情報」の受信を開始する。「パリティビット」と「操作対象のアクチュエータ情報」は対応する周波数の音量が途切れなく 0.7 秒間以上閾値以上であれば受信とする。ただし、「パリティビット」と「操作対象のアクチュエータ情報」は 0 と 1 の組み合わせで表現されているため、受信環境によってはどちらの音量も大きく、0 も 1 も受信される場合が想定される。そのため、どちらも受信判定がされた場合は、受信時の音量の累計が大きい方のみを受信するよう設定した。
- (3) 信号音の長さに対応する受信予定時間まで 1 秒間ずつ信号音の受信を続ける。
- (4) パリティチェックと信号の長さが想定通りかを確認することにより、受信信号の誤り検出を行う。
- (5) 誤りがなければ、「操作対象のアクチュエータ情報」を 2 進数から 10 進数に変換し、ESP-NOW<sup>(注7)</sup>を用いて「操作対象のアクチュエータ情報」をアクチュエーション部にプロードキャストする。

ステップ (1) では、環境音やスピーカの音量変化に対応するために、信号音とみなすための閾値を設定している。この閾値は、学内での事前実験の結果から、経験的に音取得部で取得している 250 Hz から 4000 Hz の音量の平均を 3 倍した値に設定

(注2) : <https://docs.m5stack.com/ja/unit/pdm>

(注3) : <https://docs.m5stack.com/ja/core/m5stickc>

(注4) : <https://docs.m5stack.com/ja/core/ATOMX20Lite>

(注5) : <https://docs.m5stack.com/ja/unit/buzzer>

(注6) : <https://docs.m5stack.com/ja/unit/FlashLight>

(注7) : <https://www.espressif.com/ja-jp/solutions/low-power-solutions/esp-now>

する。なお、時間帯や機器の稼働状態により周囲の環境音は変化していくことが想定されることから、閾値は定期的な更新が必要となる。本システムでは閾値更新タイミングとして、「起動直後」と「一定時間が経過後」、「本体ボタン押下時」の 3 つを設けた。システム起動後には閾値設定が最初に行われ、信号音解析部はこの設定が完了してから開始される。起動後は、一定時間（本稿では 30 秒）が経過したときに再度閾値が設定される。なお、信号受信中は信号音が比較的大きい音量で再生されていることが想定されるため、閾値再設定のタイミングとしては不適である。そこで、信号受信中は閾値の再設定は行わず延期することとした。最後に、M5StickC 画面横の A ボタンを押した際にも、受信中でない場合に限り閾値を更新することができるようとした。いずれも、閾値更新時に経過時間はリセットされ、そこから一定時間経過した際に再び更新処理がなされる。

なお、信号の受信に用いる周波数は信号に割り当てた周波数から周波数解析を行った周波数に一番近い値とする。例えば「受信開始信号」では 1481 Hz と 2468 Hz を割り当てているため、1500 Hz と 2500 Hz が閾値以上であるかを判定する。

### 3.3.2 アクチュエーション部（子機デバイス）

アクチュエーション部では、特定箇所に設置された IoT デバイスが動作する（ライトが光る・ブザーが鳴る等）部分であり、それぞれ自身の ID が割り振られている。子機は常に親機からの通信を待ち受けしており、受信した場合、オペレータが指示したい箇所が自身であるかを判定する。自身の ID が確認された場合は、接続された IoT デバイスを操作することで、オペレータが指定した機器の特定箇所を顧客に指示す。

## 4. 実験

### 4.1 実験概要

本実験では可聴音通信方式の有効性を検証することを目的とし、通話するデバイスの種類や機器の稼働音の有無によって生じる精度や音取得部で受信した音の違いを比較する。精度については信号音解析部で ID を取得するまでの動作が正常に完了するかを検証し、同時に音取得部で得た周波数解析の結果をグラフ化することで比較を行う。

### 4.2 実験内容

今回の実験を行うにあたり信号音を受信する際の顧客側受話器の設置場所として受信用 BOX を作成した。受信用 BOX の天井部分にマイクを貼り付け、受話器は画面が上向きになるように BOX 内に設置し、スピーカモードに設定することで受信を行った。これにより顧客側の環境に存在するノイズをできるだけ遮ることができると考える。また受信用 BOX の上部に親機（M5 StickC）を取り付け、閾値の更新や動作状況を確認した。なお、オペレータ側受話器の音量は適宜調節して行った。

実験パターンとして、通話するデバイスの種類による違いを比較するため、オペレータが固定電話で顧客がスマートフォンで通話する場合とオペレータと顧客のどちらもがスマートフォンで通話する場合を想定して行った。加えて、顧客側にある結束機や計量器の稼働音のノイズの有無による違いを比較するた

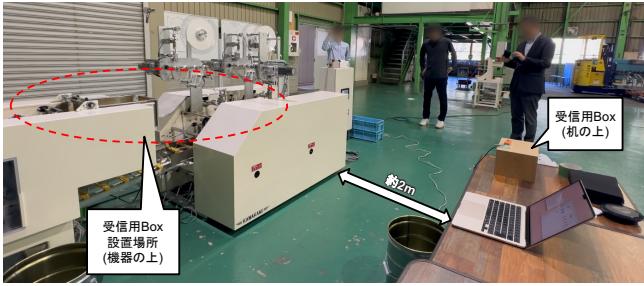


図 6: 受信用 BOX を机の上に設置した様子

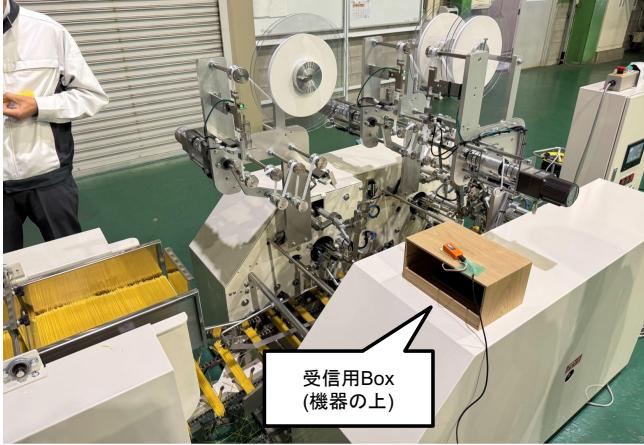


図 7: 受信用 BOX を機器の上に設置した様子

め、機器が稼働していない状況で受信用 BOX を机の上に設置した場合、機器が稼働している状況で受信用 BOX を机の上に設置した場合（図 6）、機器が稼働している状況で受信用 BOX を機器の上に設置した場合（図 7）を想定して行った。以上の 6 パターンで実験を行い、ID 0 から ID 7 を順に送ることで 3bit 分のデータが送信可能かを検証し、音取得部で得た周波数解析の結果を可視化することで比較を行う。

なお、机と機器の間は約 2m ほどの距離があり、音取得部の結果は机の上に置かれた PC へ送信される。オペレータ側の固定電話は ET-36Si-SDW（日立社製）、スマートフォンは iPhone16e（Apple 社製）、顧客側のスマートフォンは iPhone14（Apple 社製）を使用した。

### 4.3 実験結果

#### 4.3.1 固定電話からスマートフォンの場合

オペレータが固定電話、顧客がスマートフォンで通話した場合のデータ受信結果を図 8、9、10 に示す。以降のグラフでは、縦軸が周波数帯ごとの音量（マイク入力値）、横軸が時間を表し、信号の受信に用いる周波数（1500 Hz・2000 Hz・2500 Hz）は緑・オレンジ・水色、それ以外の周波数は灰色で示している。機器の稼働状況及び受信用 BOX の場所に関わらず、3bit すべてのデータを正しく受信することができた。

受信用 BOX を机の上に設置し、機器が稼働していない状況（図 8）では、顧客側には周囲の作業音が多少あったものの、受話器から離れていても人間の耳には信号音が箱から鮮明に聞こえる状況であった。また ID 0 と ID 1 の間にノイズが確認できるが、これは ID 0 の信号送信後に会話をしたためである。一

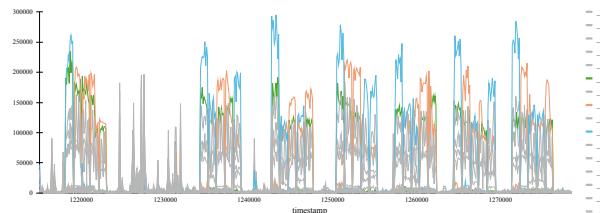


図 8: 受信結果（固定電話からスマホ／機器停止中／机の上）

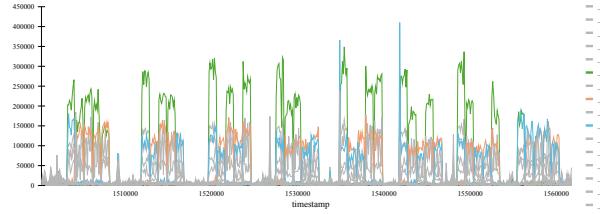


図 9: 受信結果（固定電話からスマホ／機器稼働中／机の上）

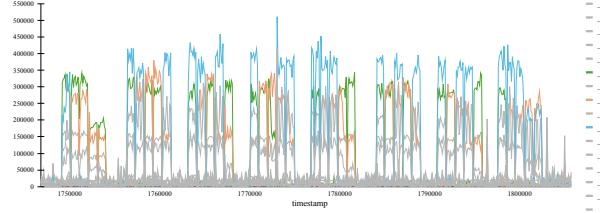


図 10: 受信結果（固定電話からスマホ／機器稼働中／機器の上）

方、機器が稼働している状況（図 9）では、人間の耳には稼働音と信号音が同じ程度に聞こえる状況であった。図 8 と図 9 を比較すると、稼働していない場合よりもノイズが多くなっていることが分かるが、いずれの場合でもすべてのデータを正しく受信できることを確認した。

受信用 BOX を機器の上に設置し、機器が稼働している状況（図 10）では、人間の耳には稼働音と信号音が同じ程度に聞こえる状況であった。ノイズは 3 条件の中で最も大きいことが分かるが、すべてのデータを正しく受信できることを確認した。

#### 4.3.2 スマートフォンからスマートフォンの場合

オペレータ・顧客ともにスマートフォンを用いて通話した場合のデータ受信結果を図 11、12、13 に示す。受信用 BOX を机の上に設置した場合は機器の稼働状況に依らず 3bit すべてのデータを正しく受信することができたが、受信用 BOX を機器の上に設置した場合について、ID 2 の受信に失敗した。

受信用 BOX を机の上に設置した場合、機器が稼働していない状況（図 11）では、固定電話からスマートフォンの場合よりも音量が小さく、顧客側では会話をしていた場面があったが受話器から離れていても人間の耳には信号音が箱から鮮明に聞こえる状況であった。また、機器が稼働している状況（図 12）では、人間の耳には稼働音が信号音より大きく聞こえる状況であった。固定電話を使用した場合と同様に稼働時のノイズが大きいものの、いずれの場合でもすべてのデータを正しく受信できることを確認した。

一方、受信用 BOX を機器の上に設置し機器が稼働している状況（図 13）では、人間の耳には稼働音が信号音よりかなり大きく聞こえる状況であった。この条件では ID 2 の受信に失敗し

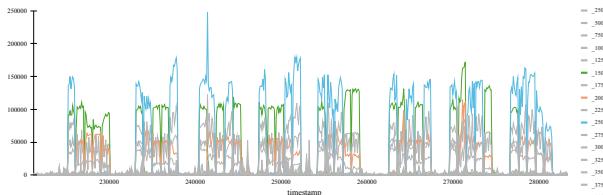


図 11: 受信結果（スマホからスマホ／機器停止中／机の上）

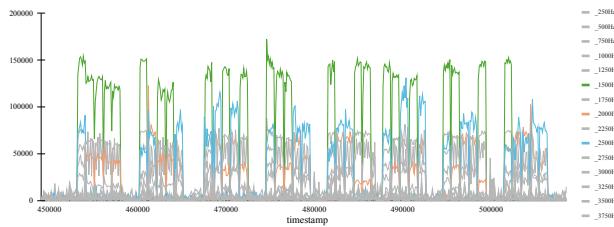


図 12: 受信結果（スマホからスマホ／機器稼働中／机の上）

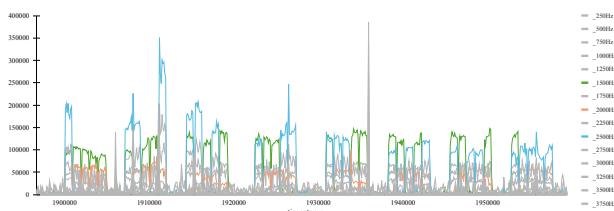


図 13: 受信結果（スマホからスマホ／機器稼働中／機器の上）

ているが、信号音（2000Hz）の音量が小さくなっていること、これまでの 2 条件と比べて稼働音を取り込みやすい状況から、閾値設定が信号音を上回る状況が発生したことが確認できた。しかしながら、他のデータの受信には成功していることから、送信データの冗長化により対処可能であると考えられる。

#### 4.4 考 察

実験結果から、設置位置・電話の組み合わせ 6 条件のうち 5 条件で 3bit 全てのデータを正しく受信することができたことから、周囲の作業音や会話、機器の稼働音などのノイズが存在する環境下においても提案手法が安定した情報通信を実現できることが確認できた。また、受信用 BOX を使用し天井に貼り付けたマイクから信号音を受け取ったことにより、ある程度のノイズを遮りながら信号音を強く受信することができるることを確認した。各グラフを確認すると、信号音の周波数の前後 250 Hz も音量が強くなる傾向が見られたが、本稿で用いた周波数の組み合わせではデータ受信への影響はなかった。しかしながら、異なる周波数の組み合わせを用いる場合には注意が必要である。

また、予備実験でオペレータ側がスマートフォンを用いてデータを送信した際に、スマートフォンのノイズキャンセリング機能によって信号音がノイズと判断され、自動的に音量調整される（信号音が小さくなる）事象を確認している。本実験でもスマートフォンを用いた場合は固定電話を用いる場合と比べて信号音の音量が低減されており、データ受信に失敗したケースでは特にその影響が顕著であったことが一因であると考えられる。これらの課題への対策としては、信号音の冗長化、ノイズと見做されないような音の組み合わせを模索する必要がある。

本稿で用いた信号音は、組み合わせた際に「和音」になるよ

うに周波数を割り当てたため、人間の耳で聞いた際に不快感はなかった。また、信号音が聞こえることによって、信号が送られているタイミングが明確に伝わるため、電話サポート中でもシステムの挙動を顧客が把握しやすいことを確認した。

## 5. おわりに

本稿では電話サポートで多くの時間を要している、初期位置共有の問題および対象物位置共有の問題の解決を目指し、既存の電話回線のみを利用した可聴音域の信号を用いた音響通信により、遠隔地の機器上の特定箇所を指示する技術の設計を行い、メーカー内の事前実験を通じて提案手法の有効性を検証した。

実験の結果、設置位置・電話の組み合わせ 6 条件のうち 5 条件で 3bit のデータを正しく受信することができたことから、機器の稼働音などのノイズが存在する環境下においても安定した情報通信を実現できることが分かった。一方で精度は周囲の環境音と信号音の音量差に依存することが分かった。加えて通話するデバイスや環境によっては信号音がノイズと認識された場合にノイズキャンセリング機能によって信号音が小さく調整される懸念もある。これらの課題への対策として、信号の送信を 1 度だけではなく複数回行うことで誤りを減らすなどの工夫が必要である。今後は実用に向けて本稿で見つかった課題への対策や受信側が固定電話である場合の検証、より実際の現場に近い環境での厳密な実験を行う。

## 文 献

- [1] 阿部太一, 平川豊, “複合音の送受信によるシニアカーと自転車の接近検知および接近方角検出手法,” 第 82 回全国大会講演論文集, vol.2020, no.1, pp.57–58, 2020. <https://ipsj.ixsq.nii.ac.jp/records/205432>
- [2] 渡邊拓貴, 寺田努, 塚本昌彦, “動作・人物・場所情報の超音波を用いた音声データへの埋め込み手法,” 研究報告ユビキタスコンピューティングシステム (UBI), vol.2013-UBI-39, no.9, pp.1–8, 2013. <https://ipsj.ixsq.nii.ac.jp/records/94682>
- [3] 森勢将雅, 山下洋一, “モスキート音に基づく電子透かしを用いた歌詞運動型音楽試聴システムの提案,” 研究報告音楽情報科学 (MUS), vol.2012-MUS-96, no.4, pp.1–6, 2012. <https://ipsj.ixsq.nii.ac.jp/records/83401>
- [4] R. Suzuki, D. Sakamoto, and T. Igarashi, “Annotone: Record-time audio watermarking for context-aware video editing,” Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, p.57–66, CHI ’15, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2015. <https://doi.org/10.1145/2702123.2702358>
- [5] S. Ahn, D. Kim, and S.-H. Ahn, “Dynamic inaudible frequency shifting communication for multi-robot collaboration in manufacturing,” Manufacturing Letters, vol.44, pp.1225–1231, 2025. 53rd SME North American Manufacturing Research Conference (NAMRC 53). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213846325001749>
- [6] R.K. Katzschmann, J. DelPreto, R. MacCurdy, and D. Rus, “Exploration of underwater life with an acoustically controlled soft robotic fish,” Science Robotics, vol.3, no.16, p.eaar3449, 2018. <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/scirobotics.aar3449>
- [7] S.-R. Yang, S.-C. Yuan, Y.-C. Lin, and I.-F. Yang, “Dtmftalk: a dtmf-based realization of iot remote control for smart-home elderly care,” Mobile Networks and Applications, vol.27, no.1, pp.196–207, 2022. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11036-020-01641-0>
- [8] 岡野裕, 寺本幸生, 野田潤, “伝搬耐性を備えた音波情報伝送技術の提案,” 研究報告ユビキタスコンピューティングシステム (UBI), vol.2013-UBI-37, no.50, pp.1–7, 2013. <https://ipsj.ixsq.nii.ac.jp/records/90985>