

修士論文

Proxemic Interactionプロトタイピング用  
距離弁別可能な音響通信の検討



2015 年 2 月 5 日

指導教員 相田 仁 教授

工学系研究科電気系工学専攻

37-136440 岡安 貴大

# 目次

---

<b>第 1 章</b>	<b>序論</b>	<b>1</b>
1.1	はじめに . . . . .	1
1.2	本論文の構成 . . . . .	3
<b>第 2 章</b>	<b>研究の背景</b>	<b>4</b>
2.1	関連研究 . . . . .	4
2.1.1	Proxemic Interaction . . . . .	4
2.1.2	音響通信 . . . . .	9
2.1.3	超音波を利用した距離計測 . . . . .	13
2.2	基礎技術 . . . . .	13
2.2.1	デジタル変調 . . . . .	13
2.2.2	誤り訂正符号 (BCH 符号) . . . . .	16
2.2.3	デジタルフィルタ . . . . .	17
2.2.4	M 系列 . . . . .	19
2.2.5	ベイズ推定 . . . . .	20
<b>第 3 章</b>	<b>提案手法</b>	<b>21</b>
3.1	目的 . . . . .	21
3.2	システム構成 . . . . .	22
3.3	システムの利用 . . . . .	22
<b>第 4 章</b>	<b>実装</b>	<b>24</b>
4.1	送信側の実装 . . . . .	24
4.1.1	M 系列を利用したプリアンプル . . . . .	24
4.1.2	帯域制限をした ASK 変調 . . . . .	25
4.2	受信側の実装 . . . . .	26
4.2.1	ベイズ推定を用いた信号復調 . . . . .	26
4.3	実験で利用可能なスピーカーについて . . . . .	26
<b>第 5 章</b>	<b>実験</b>	<b>28</b>
5.1	手動同期によるシステム最大性能の評価実験 . . . . .	28
5.1.1	実験条件 . . . . .	28
5.1.2	実験結果 . . . . .	29

## 目次

---

5.2	スピーカー特性の確認実験 . . . . .	30
5.2.1	実験手法 . . . . .	32
5.2.2	実験結果 . . . . .	32
5.3	Android 端末を用いたリアルタイム通信の評価実験 . . . . .	32
5.3.1	実験手法 . . . . .	32
5.3.2	実験結果 . . . . .	34
<b>第 6 章</b>	<b>考察</b>	<b>36</b>
6.1	システムの実現可能性について . . . . .	36
6.2	キャリブレーション処理について . . . . .	37
6.3	3つの周波数の送信問題 . . . . .	38
<b>第 7 章</b>	<b>結論</b>	<b>40</b>
7.1	まとめ . . . . .	40
7.2	今後の課題 . . . . .	40
7.2.1	距離の弁別機能 . . . . .	41
7.2.2	外部デバイスを利用しないシステム . . . . .	41
7.2.3	簡単なテキストが送信可能 . . . . .	41
7.2.4	非可聴の通信 . . . . .	41
<b>参考文献</b>		<b>43</b>

# 目次

---

2.1	対人距離 . . . . .	5
2.2	Public Ambient Display での人とディスプレイの関係 [10] . . . . .	6
2.3	Novel mode of authentication using the 2DST sheet.[14] . . . . .	8
2.4	Acoustic OFDM encoding.[23] . . . . .	11
2.5	Modulation Methods [ASK,FSK,PSK(BPSK,QPSK)] . . . . .	14
2.6	Modulation Methods [BPSK,QPSK, $\pi/4$ QPSK] . . . . .	14
2.7	16QAM . . . . .	15
2.8	OFDM の周波数帯域 . . . . .	15
2.9	BCH(7,4) 符号による符号化と復号化 . . . . .	17
2.10	FIR フィルタの設計方法 . . . . .	18
2.11	M 系列を生成するシフトレジスタ . . . . .	19
2.12	ベイズ推定 (特徴量 1 つ、クラス 2 つの場合) . . . . .	19
3.1	音圧の違いによる距離の制御 . . . . .	22
4.1	音響通信システム全景 . . . . .	25
4.2	帯域制限をした ASK . . . . .	26
4.3	波形復調に用いたクラスと特徴量 . . . . .	27
5.1	実験装置 . . . . .	29
5.2	送信波形 . . . . .	30
5.3	手動同期の実験結果 . . . . .	31
5.4	スピーカーへの入力電圧と出力音圧の関係 . . . . .	33
5.5	Android を用いたリアルタイムプログラムによる実験結果 . . . . .	35
6.1	時分割多重による信号の送信 . . . . .	39

# 表目次

---

2.1	BCH 符号の生成多項式 . . . . .	16
2.2	LPF から HPF,BPF への変換方法 . . . . .	17
4.1	高周波入力での可聴音発生の有無 . . . . .	27
5.1	実験で利用した機器 . . . . .	29

# 第1章

---

## 序論

### 1.1 はじめに

近年の急速な情報技術の発展により、1人が1台以上の情報端末を持つ事が当たり前となり、ユビキタス社会実現の環境が整ってきた。ユビキタス社会では「いつでも、どこでも、何でも、誰でも」がコンピューターネットワークに繋がり、情報システムの恩恵を受ける事が出来る。このような環境を生み出すために、Cross-Device Interaction という考えが非常に重要となる。Cross-Device Interaction とは身の回りに既にある様々な情報端末をネットワークで繋げて、新しい体験を生み出すという考えである。ここで言う情報端末とはスマートフォンに限らず、モバイルPC、身の回りのディスプレイ、電子書籍端末、ゲーム機などあらゆる情報機器を指す。例えばスマートフォンを含めたモバイル端末は中に高度にパーソナライズされた情報を持っている。街中にあるディスプレイは大きなスケールで情報を表示できる。これらを繋げる事で、互いの長所を同時に生かす事が出来る。しかしまだ標準化された接続法やネットワーク環境は出来ておらず、より自然な動作で情報のやり取りが可能な技術 [1] など様々な研究が行われている。

Cross-Device Interaction の一つに Proxemic Interaction と呼ばれる概念がある [3]。“Proxemics” とは文化人類学者である Edward Hall が作り出した造語で、空間が個々人、社会、共同体に対してもつ意味を研究する学問の事である [4]。この人が距離に対して持つ意識を情報端末にも拡張したものが Proxemic Interaction である。

Proxemic Interaction では“距離”というものが非常に重要となる。元々の Proxemics の考えにも対人距離と呼ばれるものがあり、人は相手との距離から親密度の違いを感じていると考えられている。この対人距離の考えを情報端末に適応した時、例えば公共の場所に置かれたディスプレイと人の距離や動作からその人の興味の度合いを推定し、ディスプレイに提示する情報を変化させるアプリケーション [5] や、人との距離を基に画面の構成を自動で変えるホワイトボード [6] などが生まれた。

これらの研究では、距離の情報をどのようにして得るかという事も重要である。これまでの研究の多くはカメラや距離センサー、深度カメラなどの計測機器を外部に取り付けることでシステムを構築してきた。そのため、新しい研究アイデアを簡単な構築ですぐに試すといったプロトタイピングを行う事は難しい。システムを作るための Toolkit [7] もあ

## 第1章 序論

---

るが、これもモーションキャプチャ用のビーコンや Kinect を事前に用意する必要がありこれらの需要に答える事は難しかった。そこで本研究は音響通信と呼ばれる技術に注目し、ハードウェアの制約を無くした新たなシステムを提案する。

音響通信とは音の波としての性質を利用して情報を通信する技術で、データの送信、受信にはそれぞれスピーカーとマイクロフォンが利用される。スピーカーとマイクロフォンは一般的な入出力装置で、様々な情報端末に標準的に取り付けられている。また PC などその他の情報端末でも取り付けられている事が多く、互いに通信可能な情報端末の種類が豊富である。本研究ではこの点に注目し、一般的な情報端末に備えられているの装置のみで簡単に距離を計測できれば、Proxemic Interaction システムのインフラの構築や、開発段階で気軽にシステムを試すプロトタイピングでの利用が可能ではないかと考えた。

距離計測の手段として超音波を利用する研究は多い。音響ソナーのように超音波の反射を用いて計測するものや、超音波と電磁波の速度差を利用して距離を計測する研究 [8] もある。だがこれらの方法も、専用の装置が必要なため今回の目的には合致しない。また改めて今回の目的を考えてみると、プロトタイピングでの利用に限れば厳密な距離の計測は必要が無い場合も多い。そこで目的に合致する手法として本研究では遠距離、中距離、近距離に対して送る情報をそれぞれ異なった周波数帯域にのせ、各信号の音圧を変える事で音の届く範囲をそれぞれ制御する手法を提案する。この手法では厳密な距離を計測することは出来ないが、端末に備わったスピーカー、マイクロフォンだけで実現が出来る。

またこの手法を利用する上で、搬送波周波数帯域の選択も重要である。システムを実装しても、それが大きな雑音を発するものでは使い物にならない。利用する周波数を決定する上で人の可聴域以外にも、スピーカー、マイクロフォンの性能、利用可能なサンプリング周波数も考慮する必要がある。今回目的とするシステムでは、可能な限り知覚が出来ない事、様々なデバイスで汎用的に利用可能な事を目標とする。人の可聴域は 20Hz~20kHz と言われている。しかし実際には 17kHz 以上の音は 20 代の人でも聞こえる人は多くない。またサンプリング周波数は CD で利用されている 44.1kHz が最も一般的であるが、DVD で利用される 48kHz までならほとんどの情報端末が対応している (サンプリング周波数の上限は音の再生時より録音時に問題になる)。さらに情報端末のスピーカーの対応周波数は、サンプリング周波数 44.1kHz の時の再生上限 22.05kHz までに対応している事が多い。マイクロフォンについても同様である。実際、iPhone の端末では 22kHz までの音なら正しく受信できるという報告もある [9]。これら全てを踏まえて、本研究では 17kHz~22kHz の範囲で信号を送信する事にした。

本研究では特にシステムの実現可能性を検証すべく、Android 上でシステムを構築し、PC 端末に接続したスピーカーとスマートフォン間で音響通信を行った。実験では Android での実測に加え、PC を用いてシステムの最大性能との比較も行った。結果、Android では最終的なシステムの実装には至らなかったが、PC を用いた最大性能の評価から目的とするシステムは実現可能であると確信を得る事が出来た。

### 1.2 本論文の構成

本論文は7つの章で構成されている。第1章では序論を述べた。第2章では、関連する研究と利用した基礎的な技術の説明をする。第3章では、どのような手段で目的とするシステムを構築したか説明する。第4章では、システムを構築する上で利用した通信に関する技術についてまとめる。第5章では、複数の実験を行い目的とするシステムの実現可能性について検討を行う。第6章では、実験の結果を考察する。第7章では、本研究のまとめと今後の課題について述べる。



## 第2章

---

# 研究の背景

本章では研究の背景として、関連する研究と利用する基礎技術について説明する。前半では Proxemic Interaction、音響通信、超音波を用いた距離計測の各分野の研究を紹介する。後半では音響通信を実現する上で利用した要素技術について説明する。各要素技術は無線通信で利用されている技術を参考にし、音響通信でも利用可能なものを選択した。

### 2.1 関連研究

#### 2.1.1 Proxemic Interaction

文化人類学者である Edward T. Hall は「The Hidden Dimension」の中で Proxemics を”the interrelated observations and theories of man’s use of space as a specialized elaboration of culture” と定義している [4]。つまり Proxemics とは、社会的・個人的な空間と、人間によるその知覚に関する学問である。Proxemics の重要な考えの一つに対人距離がある。Hall の定義では対人距離は大きく以下の 4 つに分類される (図 2.1)。

**密接距離 (intimate distance)** 15～45cm の距離で、人が互いに接触し合える距離。

**個人的距離 (personal space)** 45cm～1.2m の距離で、親しい人が互いに話し合う距離。

**社会的距離 (social distance)** 1.2～3.6m の距離で、客との応対で話すのに十分な距離。

**公衆距離 (public distance)** 3.6m 以上の距離で、公衆との間にとる距離。

さらに各距離ごとに近接層と遠隔層にわけた、合わせて 8 通りの分類が存在する。

この Proxemics の考えと、人とコンピューターの関係について考える Human-Computer Interaction (HCI) を組み合わせた新たな考えに Proxemic Interaction がある。Proxemic Interaction では、人と情報端末の距離や人の行動、または端末間の距離などをトリガーにコンピューターの動作を決める。また Greenberg らの研究では、Proxemic Interaction で用いられる人の行動や物の状態は以下の 5 種類に分類されると述べられている [3]。

**Distance** 人と情報端末、情報端末同士の距離の関係。

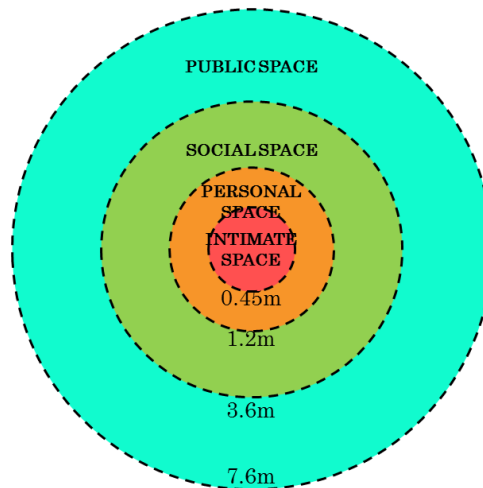


図 2.1: 対人距離

**Orientation** 動きの向き。情報端末に近づいていくか、離れてくるかなど。

**Movement** 速度などを含めた動き。人が別の情報端末に近づいていくなど。

**Identity** 識別可能性。情報端末が利用者を判別できるかなど。

**Location** 情報端末がどこに置かれているか。

これらの1つないし複数の情報を基にコンピューターは様々な動作を行っていく。以下では特に距離の考えに注目して、Proxemic Interactionに関する研究を紹介していく。

### i) 対人距離のシステムへの応用

ユビキタスコンピューティングの考えではユーザーはいつでもどこでも情報にアクセス出来る必要がある。そこで駅、空港、学校、オフィス、自宅などあらゆる場所に置かれた大型のディスプレイから個人の情報にアクセスするという考えが生まれた。しかしこのようなシステムの実現にはセキュリティの問題や、接続法の問題などを解決する必要がある。Vogelらは対人距離の概念を利用する事で、この問題を解決できるのではないかと考えた[10]。Vogelらはまず、ディスプレイと人の距離の関係を次に示す4つのゾーンに分割した(図2.2)。

**Ambient Display** 人が自然と前を通り過ぎている状態。ディスプレイにはまだ気が付いていない。

**Implicit Interaction** 人がディスプレイに気が付いた状態。

**Subtle Interaction** 人がディスプレイに興味を持ち、前で少し見つめている状態。

**Personal Interaction** 人がディスプレイに近づき、ディスプレイに触れるなど操作をしている状態。

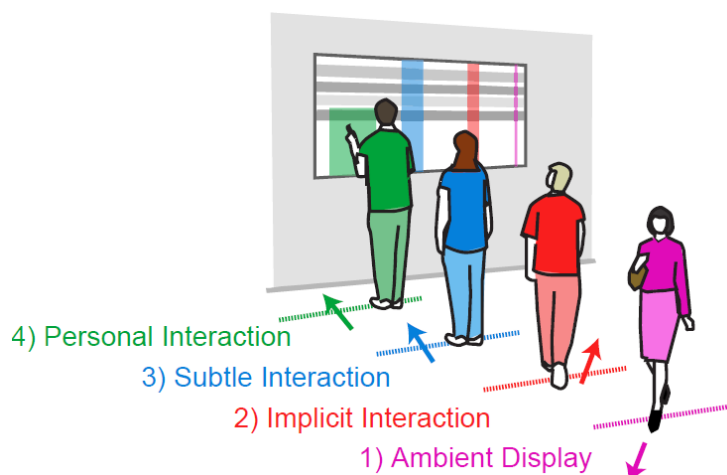


図 2.2: Public Ambient Display での人とディスプレイの関係 [10]

このシステムでは人がディスプレイに近づくほど詳しい情報が表示されるようになり、最も近い Personal Interaction では個人の情報にアクセスできるようになる。この方法により、利用者はただ近づくだけで個人の情報にアクセス出来るようになり、またディスプレイも個人を認識している間しかその情報にはアクセス出来ない。また Vogel らは実際にシステムを組み上げ、人の情報をセンサーとカメラで取得し、操作はジェスチャーとタッチスクリーンを用いて行った。

また Wang らは同様の機能を持つディスプレイを、効率の良い広告配信手段として利用する手法を提案している [5]。駅などで置かれているディスプレイでは、決まったコンテンツをループした広告配信をしているが、この方法は利用者一人一人に直接訴えかけるような効果は薄い。例えばディスプレイの前で立ち止まったり、ディスプレイに向かって歩いてくる人は、流れているコンテンツに興味を持っていると考えられる。このような人に対しコンテンツのより詳しい情報を提示できれば、最終的に購入に結び付けられる可能性が高いと考えられる。そこでこの研究では Proxemic Interaction の考えを利用し、ディスプレイ前に立つ人の状態を7つに分けそれぞれの状態で情報に変化を加えた。また人の認識技術も活用し、近付いた状態ではその個人にパーソナライズされた情報を提示するなどの工夫も行われている。

他にも Ballendat らは家庭のテレビにて Proxemic Interaction の利用を考えている [11]。人が部屋に入るだけで自動的にテレビが付き、近づくと利用可能な番組を羅列し、直接番組に触れる事で選択を行い、離れる事で全画面で番組が表示される。また別の人が来た時は、番組のタイトルなど基礎的な情報のみ表示して情報を伝え、その人が近づくと画面が分割され詳細情報が提示される。

また Proxemic Interaction の考えは表示用のディスプレイだけでなく、ホワイトボードや体験型のゲームにも適応する事が出来る。Ju らは電子ホワイトボードに距離の考えを適応した [6]。ホワイトボードでは前述のディスプレイと違い、表示する以上に書き込むという事が非常に重要となる。例えばこの研究では、ユーザーが近づくと既に書かれたコンテ

ンツを左右に避け、自動で書き込むスペースを作るなどの手法を提案している。さらにこのホワイトボードの設計を通して、利用者の暗黙の意図を汲み取りシステムに反映させる方法の議論を行っている。

Mueller らは対人距離を利用した幾つかのゲームを提案している [12]。近年プレイヤーの手の動きを利用したゲームは多く発売されているが、Mueller らはこれに加えユーザーの心理的な距離もゲームに利用しようと考えた。この考えに基づき、まくら型のデバイスを間にはさみ互いにハグする事で進めるゲームや距離情報を利用した仮想卓球ゲームなど幾つかのゲームを提案している。これらはどれも、Proxemics の密接距離などを考慮して設計されている。

### ii) 空間共有を用いたシステム

距離の情報だけではなく、同じ机の上など複数のデバイスが同じ空間を共有していることを利用したシステムも考えられている。Goel らの研究”Surface Link”では、机など同一の平面にある複数のデバイスを互いにリンクさせ、簡単なジェスチャーでデータの転送などを行う [2]。1人が1台、もしくは複数台以上スマートフォンを持っている環境で、例えば撮った写真を複数人で共有するといった需要が増えている。これまでは主に Wi-Fi や Bluetooth、NFC といった技術が利用されてきたが、より簡単に複数人に対し同時にデータを送る技術が必要とされている。Surface Link ではデバイスが互いに内蔵のバイブレーションを用いて、互いに同一の平面上にいる事を知らせ合う。同一の平面上にいるという事を認証情報として、互いにデータの共有が行えるようになる。

また、Surface Link ではジェスチャーの認識や互いのデバイスの位置把握に音を利用している。そこでもう少し詳しく原理について説明する。Surface Link でのデータの転送は、送信元のデバイスから送信先のデバイスに向かって机の上を指で擦る事で行われる。例えばこの動作を認識する時、デバイスはオンデバイスのマイクロフォンから指が机をこする音を拾い、音が自身に近づいて来ることを認識する。他のジェスチャーでも同様に音を利用して認識を行う。このジェスチャーにより、ユーザーは自然な動作で複数の情報端末を操作できる。

デバイス同士が互いの相対位置を知る時にも音が利用される。ユーザーはまず複数のデバイスの間を円を描くようなジェスチャーを行う。音のピーク時間をデバイス同士が共有する事で、それぞれのデバイスは自身の隣にどのデバイスがあるのかを知る事が出来る。さらに各デバイスはオンデバイスのスピーカーから 18kHz と 18.5kHz の音を出し、周囲のデバイスは音圧の差からそのデバイスが左右どちらにあるか知る事が可能となる。Surface Link はオンデバイスの装置のみで各動作の認識率が 90%前後の高い認識率を示している。

同じく机の上にある複数の端末を利用したシステムに Kortuem らの研究がある [13]。この研究は同じ机に集まった複数のユーザーへのサポートとして、それぞれが持つデバイスの位置情報を利用しようというものである。デバイスの位置情報の取得には各々の PC に取り付けられた USB ドングルを利用する。USB ドングルは互いに peer-to-peer の通信を行い、互いの位置を自動でやり取りする。この USB ドングルを利用したアプリケーションとして、互いに初対面の人同士でのミーティング時などに名前や所属の情報を自動で PC が

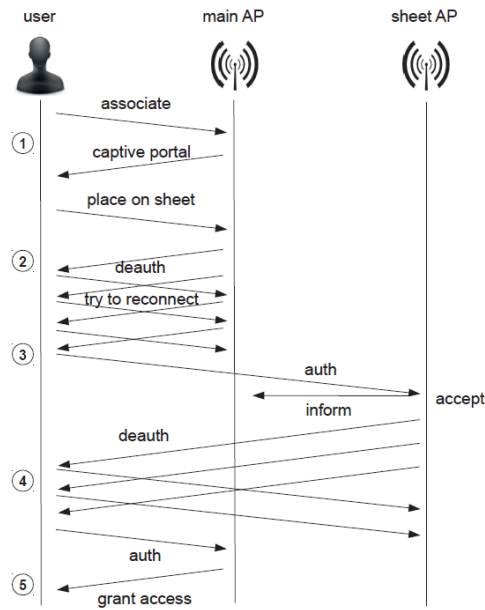


図 2.3: Novel mode of authentication using the 2DST sheet.[14]

取得するなどが考えられる。

これらの研究のように同じ環境や空間を共有した複数の情報端末を繋げる事で、直感的操作が可能なアプリケーションやユーザーをサポートするアプリケーションを実現する事が出来る。

### iii) 近距離を利用したシステム

互いに離れた情報端末の距離を測るのではなく、逆に情報端末が接触した事を利用して新しいアプリケーションを作る研究もある。次の二つの研究はどちらも Two-Dimensional Signal Transmission sheet(2DST sheet) と呼ばれる特殊なシートを用い、電磁波の到達範囲を数 cm という近距離に絞る事で実現した研究である。

Budde らの研究ではこのシートを用い、Wi-Fi を利用したタッチセンサーを作製した [15]。近年、Wi-Fi hotspot の整備が進み、手動での認証に代わる新しい認証手段が必要とされている。Budde らはこの点に注目し、このタッチセンサーに触れる事で hotspot の認証を行えるシステムを提案した。図 2.3 に認証システムの方式を載せる。接続したい Access Point(Main AP) に接続要求を出したユーザーは、2DST sheet を利用した Access Point(sheet AP) に情報端末を触れるよう要求される。ユーザーは自身の情報端末をこの sheet に触れるだけで認証を行う事が出来る。また実験でデバイス毎に差はあるが、実験で 1cm~5cm の範囲での電波到達距離の制御に成功している。

Nakatsuma らの研究では 2DST sheet に加工を加え、上に置いたデバイスがシート上の位置情報を取得できるようにした [15]。取得の方法はシート内の金属メッシュを部分的に加工し静電容量を変化させ、そのパターンを読み取る事で行う。またシートは内部に電気

を通す事ができるので、シートを通じて電力供給やデバイス同士の通信も可能である。これらの特徴を利用する事で、特定の場所同士のデバイスが自動でペアリングをしたり、効率的な電力供給が可能となる。将来は壁や床、机の上などあらゆる場所にこのシートを貼る事で、室内のどこからでも情報機器にアクセス可能なユビキタス環境を実現出来る。

これらの研究のように情報端末が接触しているという事を検知する事で、端末同士の認証を行う事も可能である。

### iv) Proxemic Interaction の Toolkit

Proxemic Interaction の概念を利用する事でこれまで挙げたような様々なアプリケーションが実現出来る。しかし Proxemic Interaction を実現する為には、距離測定の為のセンサーの準備など技術的に解決すべき課題も多い。Marquardt らはこれらの技術的課題解決の為、誰もが Proxemic Interaction のシステムを構築できる Toolkit を提案している [7]。この Toolkit では Greenberg らが提唱する Proxemic Interaction で利用される 5 つの情報 (Distance、Orientation、Movement、Identity、Location)[3] に加え、視覚的な情報、3D モデルを用いた位置情報、録画機能、拡張的なセンサー情報などシステム実現に必要な様々な機能を利用する事が出来る。Toolkit の利用には全体を制御する PC に 2 つのセンサーを接続する必要がある。1 つは人の動作を取得するためのモーションキャプチャ用のビーコン、もう 1 つは人の位置や距離情報を取得可能な Microsoft 社の Kinect[?] である。また実際にこの Toolkit を利用し、学生が 1 週間という短い期間で Proxemic Interaction のアプリケーションを作れる事が実証されている。

以上が Proxemic Interaction の研究動向である。Proxemic Interaction の概念を用いる事で、距離を様々な利用し新たなアプリケーションを生み出す事が出来る。また

### 2.1.2 音響通信

音響通信とは音を用いて通信を行う技術で、古くは音響カプラで利用された。音響カプラとは電話機の受話器へスピーカとマイクロフォンを用いて音響的に接続し、データ通信を電話線を介して送る装置の事である。現在でも通信網が十分に整備されていない国や地域において利用されており、通信速度が 28.8kbps の製品も市販されている。

またこの音響通信を水中で利用しようという研究も近年盛んに行われている。水中で電磁波はすぐに拡散してしまい、遠くまで通信を送る事が出来ない。しかし伝送媒体中を伝わる疎密波である音は、液体中や固体中でも問題無く伝わる事が出来る。そのため、これまで実現の難しかった水中でのワイヤレス通信に音響通信を利用する研究が行われている。

だが大気中での音響通信は、電磁波を用いた無線技術よりもメリットを見出しにくく、これまで余り研究されてこなかった。しかし近年の急速なスマートフォンの普及により、この技術に再び注目が集まっている。スマートフォンは単体でスピーカとマイクロフォン備えており、さらに PC と遜色無いレベルの演算をする事が可能である。また音は無線よりも伝達距離を制御しやすく、数 cm ~ 数 m という無線では制御の難しい近距離で通信を制御する事が可能である。これらのメリットを生かし、数社の企業が音響通信を利用した

## 第2章 研究の背景

---

新たなサービスを相次いで発表している。

以下で音響通信に関する最近の研究について、水中音響通信、大気中での音響通信、スマートフォンを利用したサービスという3つの視点から紹介する。

### i) 水中音響通信

水中での音響通信の利用法として、水中センサーネットワークの構築 [16, 17]、有人もしくは無人探査機の操作 [18, 19] などが挙げられる。Akildiz らの研究では水中センサーネットワークを構築できた場合の具体的な利用法についてまとめている [16]。

**海洋サンプリングネットワーク** 自動探査マシンとセンサーを用い海底の三次元的な地形情報を得る

**環境モニタリング** 海中の物質濃度を計測し、環境汚染などのモニタリングする。

**海中探査** 海中のセンサーネットワークが油田や資源の発見の補助をする

**災害の防止** 地震活動などの計測を行う

**船舶などへのナビゲーション** 浅い海や、海中の障害物情報を船舶に伝える

**該当海域の監視** 自動の探査マシンやセンサーがエリア内に侵入した潜水艦等を監視する

**機雷等の探査** 機雷等の物体を発見する

しかし実現にはまだ幾つかの問題を解決する必要がある。そこにはネットワークノードのハードウェア的な問題もあるが、音響通信自体の問題も多く含まれる。例えばマルチパスフェージングの通信への影響である。マルチパスフェージングとは送信機から発信された信号が複数の経路を通過して受信機に届く事で、遅延波が通信のノイズになってしまう現象である。これは無線通信でも問題となる事だが、音響通信では音の伝達速度が電磁波と比べ非常に遅いためより重要な問題となる。また他にもスピーカーで送信可能な周波数や帯域の問題などがある。

これらの課題を克服し、実際に実海域での通信実験を行った研究もある [18, 19]。越智らの研究では洋上の船から海底付近の無人探査機の操作を目的として、距離 500m での音響通信の実験を行った。幾つかの変調方式での実験の結果、500m の距離で 80kbps、300m の距離で 120kbps の誤り無しの通信を実現している。また実験には専用に開発された超音波スピーカーを利用している。この超音波スピーカーでは中心周波数 80kHz、帯域幅 40kHz での送信が可能である。

### ii) 大気中での音響通信

大気中では電磁波での通信が利用出来るため、速度の遅い音響通信が利用される事は多くなかった。しかし音響通信は電磁波による通信と比べ通信距離の制御が簡単であるというメリットがある。例えば電磁波ではある程度の厚さならば壁なども通り抜けてしまい、通信距離を制御する事は難しい。この性質を悪用し、War Driving といった手法で漏れ出した無線 LAN の電磁波を取得する方法もある。しかし音響通信では壁を越えての伝達は難し

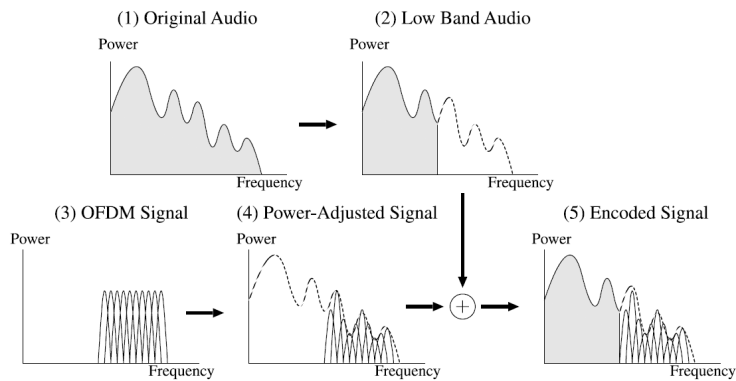


図 2.4: Acoustic OFDM encoding.[23]

く、さらに音圧や指向性の制御により到達距離や範囲を制御する事が容易である。さらに最近、音楽などのデータに音響通信の情報を入れる技術の研究もされている [21, 22, 23]。これは元々、電子透かしと呼ばれる技術の中で CD などの音源に著作権情報を入れるために利用された技術の延長である [24]。音楽の質を落とさずデジタル通信の情報を入れる事で、スマートフォンをかざすだけで情報が伝達されるといったエンターテイメントでの利用が考えられる。以下でより具体的な研究内容について紹介する。

距離の制御について、Nandakumar らの音響 NFC の研究がある [20]。NFC とは Near Field Communication の事で、数 cm から 1m 程度の狭い範囲でのみ通信を行う技術でタッチセンサーなどで利用されている。Nandakumar らの研究では音響通信を利用してこの NFC の実現を目指した。NFC のハードウェアはまだ普及が十分で無く、音響通信ではこれを一般的なスピーカーとオンデバイスのマイクロフォンで実現出来るメリットがある。さらに上記でも述べたように、通信の距離の制御が簡単である事もメリットである。ただ NFC ではクレジットの決済情報など秘匿性の高い通信も行われる。この研究では通信傍受への対策として、通信信号と同時に既知の雑音を重畳する手法を提案している。これにより仮に通信が傍受されても雑音の情報を知らない第三者は信号を復調する事が出来ない。これらの手法によりこの研究では 10cm 程度の距離で最大 2.4kbps のセキュアな通信を実現している。

また音楽の中に変調したデジタル信号を埋め込む研究として松岡らの研究がある [21, 22, 23]。この研究では OFDM で変調した信号を、聴覚に不快にならないように可聴域の音楽に埋め込む事を目指している。可聴域の音楽に情報を埋め込むようにする事で、市販のオーディオ機器で再生録音出来るだけでなく、テレビやラジオ放送でも情報を送る事が可能となる。この研究では図 2.4 のようにオリジナルの音楽や音声信号の高域部分を除去し、そこに OFDM のサブキャリアをオリジナル音源のスペクトル包絡に合わせてパワーを調整したものを挿入して信号を作成する。市販のマイクロフォンの対応周波数が 10kHz までのものが多い事から、OFDM の信号幅を 5kHz 程度、上限を 10kHz として通信を行っている。結果、1m 程度の範囲で 72byte のテキスト情報の送受信に成功した。



### iii) スマートフォンを利用したサービス

近年、音響通信を利用したスマートフォン向けの新たなサービスを各社が展開している。以下で代表的なサービスについて紹介する。

楽器のメーカーとして知られるヤマハはINFOSOUNDという名前のサービスを2012年から展開している[25]。INFOSOUNDでは利用者はまず「INFOSOUND ブラウザ」という専用アプリケーションをスマートフォンにインストールする。このアプリケーションを起動し、INFOSOUNDの情報を発信しているスピーカーに近付けるとスマートフォンは音響IDと呼ばれる短いデジタルデータを受信する。受け取った音響IDはネットワークを通じてサーバーに問い合わせる事でURL情報に変換される。このURLにアクセスする事で、目的とするコンテンツにアクセスする事が出来る。利用されている周波数は18kHz～20kHzで、一般的なスピーカーで使用可能である。また伝送距離は10m以上で、80bpsの通信が可能である。使用シーンの例として以下が挙げられている。

- TVを見ている時に、TV番組に連動したコンテンツを表示できる。
- お店の中でBGMからお店のクーポンなどを受信できる。
- 美術館で目の前の展示物についての解説が表示される。

さらにこの技術をベースとして、株式会社ぐるなびは「ima ココデ」と呼ばれる来店検知のアプリケーションを開発している[26]。

通信キャリアのNTT docomoが提供する「ショッぷらっと」というサービスも音響通信を利用している[27]。仕組みはINFOSOUNDとほぼ同じで、店舗内など限られたエリアにのみ音コードと呼ばれる情報を送信し、スマートフォンがそのエリアに入るとサーバーと通信しポイントを得る事が出来る。店側は専用の音波装置を起し、あらかじめ売り場ごとに固有の波形をもつ音波を登録する必要がある。通信に音波を採用した理由は、10mという限られた範囲での通信が可能なためである。

NTT docomoはさらにこの「ショッぷらっと」で培った音波技術によるチェックイン機能を元に、「Air Stamp」と呼ばれるソリューションを提供している[28]。このソリューションを利用したアプリケーションとして、JR東日本が提供する「JR東日本アプリ」がある[29]。このアプリケーションでは電車の各車両に音波装置を設置し、利用者は現在自分がどの車両に乗っているかを知る事が出来る。

株式会社 Will Smart も「apno」と呼ばれるサービスを展開している[30]。このサービスも「ショッぷらっと」に似た音響通信を用いた店舗でのクーポン配信などを行っている。

他にもGoogleが発売した小型メディアストリーミング端末であるChromecastに、新たな機能として超音波を用いたペアリング機能を追加するという話題もある。

これまでのサービスをまとめると、スマートフォン向けのサービスでは音響通信の以下の3つのメリットを生かしている。

- スピーカー、マイクロフォンの調達の容易さ
- 音波の到達距離制御の容易さ
- 18kHz以上の帯域を利用した場合の人の知覚の難しさ

### 2.1.3 超音波を利用した距離計測

超音波を用いて距離を計測する手法は古くから研究されている。最も代表的な方法は音響ソナーである。アクティブソナーと呼ばれる方法では、発信した音波が反射して戻ってくるまでの時間を測り距離を計算する。

またアプリケーション用途としての距離計測手法も多く研究されている。Priyantha らの研究では電磁波と音波の到達時間の差を利用した距離計測手法を提案している [8]。位置測定の方法は室内に複数のビーコンを配置し、受信側はそこから発信される超音波と電磁波の時間差から相対的な位置を知る。そのためビーコン自体の位置は受信側が事前によくしておく必要がある。このビーコンを2つ置く事で、2つのビーコンの間に仮想的な境界線を引く事も可能である。

また近年、野外での位置計測にはGPSを利用するのが一般的である。しかし室内では衛星からの電波が届かない為、GPSは利用出来ないという問題点がある。そこでGPSに代わる室内での高精度な位置計測手法としても超音波を利用した位置計測手法が注目されている。Hazasらはより広帯域な周波数を利用する事で高精度な位置検出の実現を目指している [31]。Hazasらはピエゾ素子を利用した専用の送信機を作製し、中心周波数50kHz、帯域幅20kHzの信号を作製した。さらに信号をCDMA方式で変調する事で、距離計測に必要な情報を音響通信により伝達した。結果誤差5cm程度の非常に高精度な通信を実現している。

さらに距離計測の精度を高める研究として、橋爪らの研究がある [32]。このシステムではTOA(Time of Arrival)方式による距離計測とAOA(Angle of Arrival)方式による信号の到達方向計測により位置を決定する。AOA方式では送信機から発信された超音波が、受信機の2つの超音波受信素子に到達する時間差を利用して送信機との角度を計算する。TOA方式では信号到達時間の計測に、位相一致法(Phase Accordance Method)と呼ばれる手法を用いている。この方法では周波数のわずかに異なる2つの波を重ね「うなり」を生むことで、波の位相を精度よく測る事が出来る。計測に振れ幅でなく位相を用いる事で超音波の低減やノイズに強い高精度な測定が実現出来る。

以上が超音波を利用した位置計測手法であるが、どの手法も専用の装置が必要であるという欠点がある。

## 2.2 基礎技術

以下では音響通信を実現する上で利用した基礎技術として、デジタル変調、誤り訂正符号、デジタルフィルタ、M系列、ベイズ推定について説明する。

### 2.2.1 デジタル変調

0、1で構成されたデジタルデータを信号にのせて送信する時、デジタル変調技術が利用される。代表的な変調方式として、振れ幅の違いで0と1を表現する振幅偏移変調(ASK)、周波数の違いで表現する周波数偏移変調(FSK)、位相の違いで表現する位相偏移変調(PSK)、

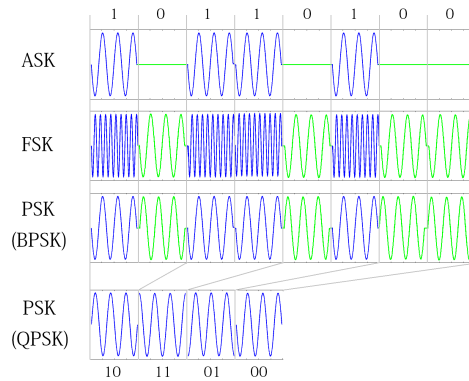


図 2.5: Modulation Methods[ASK,FSK,PSK(BPSK,QPSK)]

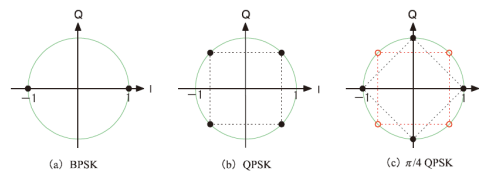


図 2.6: Modulation Methods[BPSK,QPSK, $\pi/4$ QPSK]

ASK と PSK を組み合わせる事でより多くの bit を信号にのせられるようにした直角位相振幅変調 (QAM) などがある。各変調方式についてより詳しく説明する。

### i) 振幅偏移変調 (ASK)

ASK は最も基礎的な変調方式で、信号の有無によって 0,1 を伝える On Off Keying(OOK) などが代表的な手法である。ASK は実装が簡単な反面、ノイズの影響を受けやすいという欠点や、伝送には線形性の高い送信増幅器が必要といった課題もある [33][34]。

### ii) 位相偏移変調 (PSK)

PSK は位相の変化で 0,1 を伝える。図 2.6 の様に、位相の配置により 1 つの信号により多くの情報をのせる事も可能である。PSK の欠点として信号点の変化時に大きな信号振幅の変化が生じる事がある。この問題を軽減するため、 $\pi/4$ QPSK の様に偶数シンボルと奇数シンボルで信号点の配置をずらす事で信号点が原点を通らないように工夫された方式も考えられている。

### iii) 周波数偏移変調 (FSK)

FSK は変調信号により周波数を変化させる手法で、PSK と同様に振れ幅が一定の信号を伝送する。また、PSK で問題となった信号点の切り替わり時の大きな信号変化を無くすた

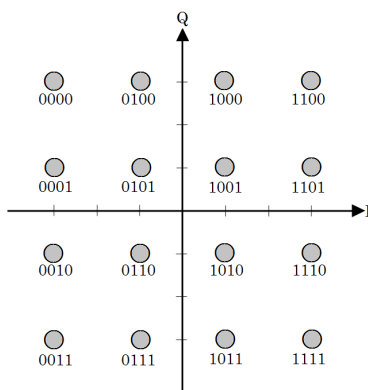


図 2.7: 16QAM

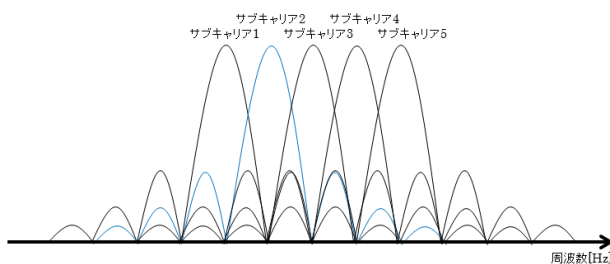


図 2.8: OFDM の周波数帯域

め、周波数切り替え時に位相を連続させる CPFSK という方式がある。さらに CPFSK のうち占有帯域を狭くしたものを MSK、ガウスイルタを掛け帯域を狭めたものを GMSK と呼ぶ。

#### iv) 直角位相振幅変調 (QAM)

ここまでの変調方式はどれも波のパラメータ (振れ幅、周波数、位相) のうち 1 つを変化させるものだが、2 つのパラメータを変化させればより高効率な変調を実現出来る [35]。一つの波にのせられる情報量が 4bit のものを 16QAM、6bit のものを 64QAM、8bit のものを 256QAM と呼ぶ。図 2.7 は 16QAM のシンボル割り当てで、3 つの振れ幅と最大 8 つの位相変化で表されている事が確認できる。

表 2.1: BCH 符号の生成多項式

$n$	$k$	$n - k$	$t$	生成多項式 $G(x)$
7	4	3	1	$x^3 + x + 1$
15	11	4	1	$x^4 + x + 1$
15	7	8	2	$(x^4 + x + 1)(x^4 + x^3 + x^2 + x + 1)$
15	5	10	3	$(x^4 + x + 1)(x^4 + x^3 + x^2 + x + 1)(x^2 + x + 1)$
31	26	5	1	$x^5 + x^2 + 1$
31	21	10	2	$(x^5 + x^2 + 1)(x^5 + x^4 + x^3 + x^2 + x + 1)$
31	16	15	3	$(x^5 + x^2 + 1)(x^5 + x^4 + x^3 + x^2 + x + 1)(x^5 + x^4 + x^3 + x^2 + x + 1)$
31	11	20	5	$(x^5 + x^2 + 1)(x^5 + x^4 + x^3 + x^2 + x + 1)(x^5 + x^4 + x^3 + x^2 + x + 1)$ $(x^5 + x^4 + x^3 + x^2 + x + 1)$
31	6	25	7	$(x^5 + x^2 + 1)(x^5 + x^4 + x^3 + x^2 + x + 1)(x^5 + x^4 + x^3 + x^2 + x + 1)$ $(x^5 + x^4 + x^3 + x^2 + x + 1)(x^5 + x^4 + x^3 + x^2 + x + 1)$

### v) OFDM

直交周波数分割多重方式 (OFDM) はデータを複数の搬送波 (サブキャリア) にのせて通信する。サブキャリアは互いに直交している為、互いに干渉せず周波数軸上で密に並べる事が可能である (図 2.8)。

OFDM は音響通信において注目されている変調方式である。OFDM が音響通信に適している理由の一つとして、他の高速通信と比べマルチパス伝送による遅延波の影響が限定的である事が挙げられる。他の変調方式では与えられた周波数帯域を目一杯使い高速な通信を実現するのに対し、OFDM では周波数帯域を細かく分割し各サブキャリア毎に通信を行う。各サブキャリアの帯域幅は非常に狭く、通信速度は低速である。そのため他の変調方式では問題になるような遅延波でも、OFDM のサブキャリアでは 1 シンボル内の時間に収まり通信に影響を与えない可能性がある。また OFDM では各シンボル間にガード・インターバルと呼ばれる区間を設ける事で、遅延波によるシンボル間干渉を抑制する機能もある。これは電磁波と比べ空間の伝播速度が非常に遅い音で通信する場合には大きなメリットとなる。

### 2.2.2 誤り訂正符号 (BCH 符号)

受信したデジタルデータが正しいかを受信側で確認する手段として誤り訂正符号がある。誤り訂正符号は送信時に信号に冗長ビットを付加し、受信側ではその情報を元に信号を修正する。本研究では代表的な誤り訂正符号の一つである BCH 符号を利用して通信の信頼性を高めた。以下で BCH 符号について説明する。

誤り訂正符号はブロック符号と畳み込み符号に分けられ、BCH 符号はブロック符号に属する。ブロック符号では入力情報を  $k$  ビット毎に分割し、誤り訂正符号  $m$  ビットを付加する事で  $n (= m + k)$  ビットの符号を作る。他の代表的なブロック符号にハミング符号があるが、BCH 符号はこのハミング符号を拡張した誤り訂正符号である。BCH 符号はハミング

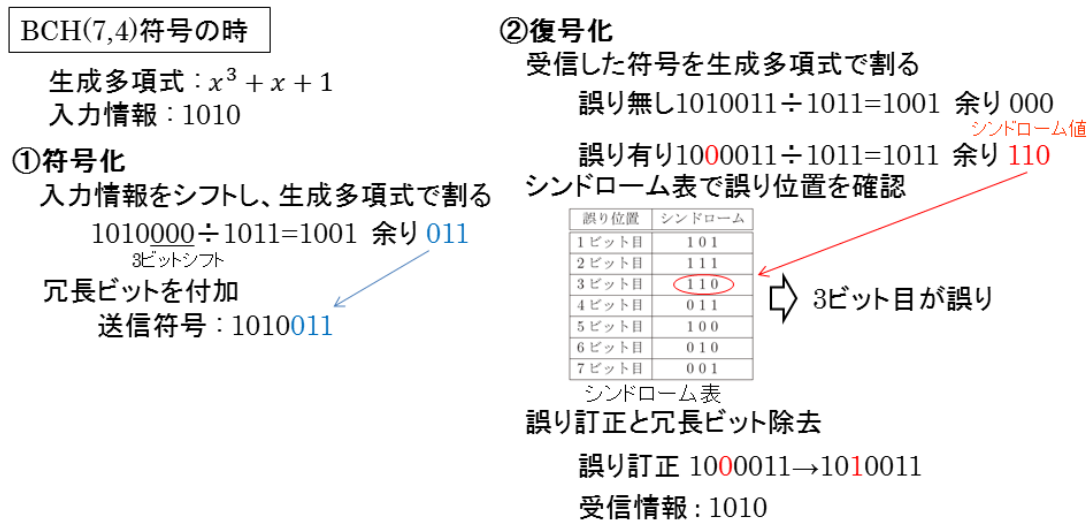


図 2.9: BCH(7,4) 符号による符号化と復号化

表 2.2: LPF から HPF, BPF への変換方法

変換	角周波数の変換式	変換式
LPF → HPF	$\omega_c^{(LPF)} = \omega_s/2 - \omega_c^{(HPF)}$	$h(n)^{(HPF)} = (-1)^n h(n)^{(LPF)}$
LPF → BPF	$\omega_c^{(LPF)} = (\omega_2 - \omega_1)/2$ ( $\omega_1 < \omega < \omega_2$ となる BPF)	$h(n)^{(BPF)} = 2h(n)^{(LPF)} \cos n\omega_0 T$ ( $\omega_0 = (\omega_1 + \omega_2)/2$ )

符号では出来なかった複数ビットの誤り訂正が可能である。さらに BCH 符号では目的に応じ誤り訂正能力を拡張する事が可能であり、柔軟な設計が可能である。

BCH 符号では表 2.1 に示すような生成多項式を利用して符号化を行う (表は符号長 31 ビット以下のもの)。符号化の時は生成多項式  $G(x)$  で入力情報を付加する冗長ビット分シフトしたものを割り余りを求める。この余りを冗長ビットとして付加する。復号化時、1 ビット誤り訂正の時は受信した符号を再び同じ生成多項式で割る (この時の余りをシンδροーム値と呼ぶ)。シンδροーム値が 0 の時は誤り無し、その他の値の時は対応したシンδροーム表を基に誤り位置を見付ける。2 ビット誤り訂正以上の時は、生成多項式の因数分解結果の式 (2 ビット誤り訂正では 2 つ) それぞれからシンδροーム値を求める。この 2 つのシンδροーム値の組み合わせから、誤り位置を検出する。図 2.9 に BCH(7,4) の時の例を載せる。

### 2.2.3 デジタルフィルタ

通信を行う上でローパスフィルタ (LPF) やバンドパスフィルタ (BPF) は必要不可欠である。フィルタの作成方法は様々なものがあるが、本研究では代表的かつ処理の速い有限インパルス応答フィルタ (FIR フィルタ) を用いた手法を利用した。以下で FIR フィルタでの LPF、BPF の設計法を説明する。

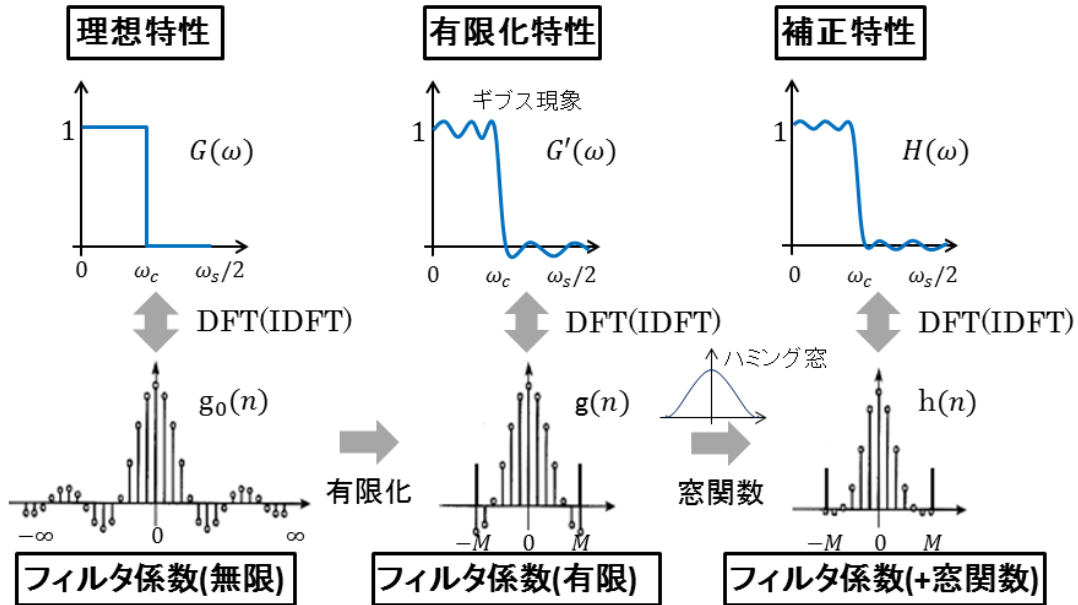


図 2.10: FIR フィルタの設計方法

LPF の設計を例に FIR フィルタの設計法を説明する。図 2.10 が設計法の概要である。仮にカットオフ周波数が  $\omega_c$  の FIR-LPF の設計は以下の手順で行われる (ただし、サンプリング周波数を  $\omega_s$  とする)。まず理想特性  $G(\omega)$  から離散時間逆フーリエ変換 (IDFT) によりフィルタ特性を計算する。

$$G(\omega) = \begin{cases} 1 & (|\omega| \leq \omega_c) \\ 0 & (|\omega| > \omega_c) \end{cases} \quad (2.1)$$

$$g_0(n) = \frac{1}{\omega_s} \int_0^{\omega_s} G(\omega) \cos n\omega d\omega = \frac{2}{\omega_s} \int_0^{\omega_c} 1 \cos n\omega d\omega = \frac{2 \sin n\omega_c}{n\omega_s} \quad (2.2)$$

これは離散化された sinc 関数である。このままではフィルタの係数が無限となってしまうので、有限範囲で打ち切る必要がある。仮に  $\pm M$  でフィルタ係数を打ち切ったとする ( $g(n)$  とする)。この時、打ち切りによる誤差でギブス現象により周波数領域のフィルタは大きく揺らいでしまう。この誤差を軽減するためにフィルタに窓関数かける事で打ち切り部分での不連続性を抑制する。利用される窓関数には様々な種類があるが、本研究ではハミング窓を利用した。

$$w(n) = 0.54 - 0.46 \cos 2\pi(n/(2M + 1)I + 1/2) \quad (|n| \leq M) \quad (2.3)$$

として、求めたい FIR-LPF  $h(n)$  は以下の通りとなる。

$$h(n) = w(n)g(n) \quad (|n| \leq M) \quad (2.4)$$

ただしリアルタイムの信号処理をする場合、このままでは因果性を満たしていないそのため実際に利用する時にはフィルタをシフトする必要がある。

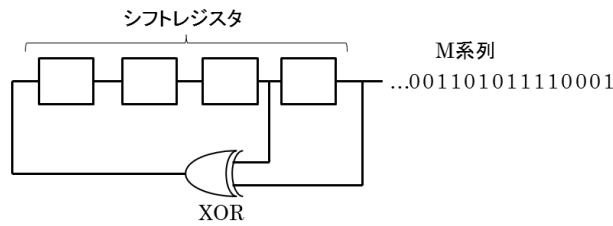
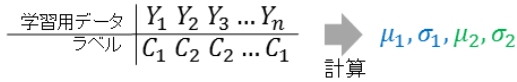
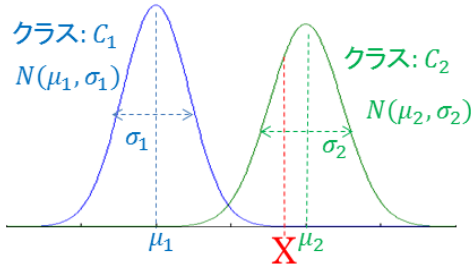


図 2.11: M 系列を生成するシフトレジスタ

①: 事前学習



②: 確率モデル推定



③: クラスの判別

尤度の比較

$$N(X; \mu_1, \sigma_1) < N(X; \mu_2, \sigma_2)$$

より

$X$ はクラス $C_2$ に属すると推定

図 2.12: ベイズ推定 (特徴量 1 つ、クラス 2 つの場合)

また、その他の HPF や BPF は得られた LPF の係数を変換する事で得る事が出来る。変換の対応は表 2.2 の通りである。

### 2.2.4 M 系列

M 系列とはシフトレジスタを用いて発生できる系列の中で最も周期の長い系列の事で、疑似乱数列の生成などに応用されている [38]。M 系列の重要な性質として、M 系列を繰り返した信号の自己相関関数を計算するとインパルスが得られる。本研究ではこの性質を利用し、プリアンプル部分にこの M 系列を挿入する事で通信信号の検出を行った。

M 系列の生成には図 2.11 のようなシフトレジスタが利用される (図は 4 段の場合)。シフトレジスタからの出力が M 系列となる必要十分条件は、線形漸化式が原始多項式であることである。一般に  $n$  段のシフトレジスタからは最長周期  $N = 2^n - 1$  の系列が得られる。



## 2.2.5 ベイズ推定

本研究では信号波形からデジタルデータの読み取りにベイズ推定を用いた。ベイズ推定は生成モデルと呼ばれる考え方で、ある観測事象が原因となる確率モデルから生成されたと考え、その確率モデルを推定する事で得られた観測事象がどのモデルに属するかを確率的に推定する手法である。数式では以下のように説明される。ベイズの定理によりある事象  $X$  が発生した時、それがクラス  $C$  から発生したものである条件付き確率  $P(C|X)$  は以下のように変形できる。

$$P(m|X) = \frac{P(X|C)P(C)}{P(X)} \quad (2.5)$$

この時、最終的に  $X$  がどのクラスから発生したのか決める為には  $\operatorname{argmax}_C P(C|X)$  を計算する必要がある。ここで各クラスは同一の確率で起こると仮定し、さらにクラス  $C$  の確率分布が正規分布であると仮定すると上記の式はさらに次のように変形できる。

$$\operatorname{argmax}_C P(C|X) = \operatorname{argmax}_C \frac{P(X|C)P(C)}{P(X)} \quad (2.6)$$

$$\approx \operatorname{argmax}_C \mathcal{N}(X; \mu_C, \sigma_C) \quad (2.7)$$

ここで  $\mu_C$  と  $\sigma_C$  はそれぞれ事前学習から計算された特徴量の平均と分散である。

推定方法を特徴量1つ ( $X$ )、クラスが2つ ( $C_1, C_2$ ) の時を例に図 2.12 を用いて説明する。推定の為には事前の学習により確率モデルを推定する必要がある。今回、確率モデルを正規分布と仮定したので、各クラスに対応した平均 ( $\mu_1$  と  $\mu_2$ ) と分散 ( $\sigma_1$  と  $\sigma_2$ ) を学習用特徴量 ( $Y_1 \dots Y_n$ ) から求めればよい。得られた各確率モデルにクラスが未知の特徴量  $X$  を代入する事で、 $X$  が各クラスに属する尤度を計算する事が出来る。今回の場合はクラス  $C_2$  の方が尤度が高いため、 $X$  はクラス  $C_2$  に属すると推定出来る。

## 第3章

---

# 提案手法

### 3.1 目的

Proxemic Interaction において情報端末間や情報端末と利用者との距離を知るという事は非常に重要である。これまでのシステムでは Kinect や超音波装置、複数台のカメラなど、外付けのデバイスを用いて距離の計測を行ってきた。確かにこれらの装置を利用すれば数 cm や数 mm の精度での距離を取得する事が出来る。しかし Proxemic Interaction のアプリケーションとして見た時、ここまでの精度が必要でない場合も多い。そこで本研究では音響通信に注目し、これらの外付けのデバイスを利用せず、より簡単に端末間距離を知る事が出来るシステムの提案をする。

本研究では以下の要件を満たすようなシステムの実現を目指す。

**距離の弁別機能** 3つの距離を弁別出来るようなシステム

**外部デバイスを利用しないシステム** 一般的な情報端末に元々備わっている機能のみで実現出来る

**簡単なテキスト情報を送信可能** 音響通信を用い、URL などの情報を送れるようなシステム

**非可聴の通信** 高周波の音を利用し、人が知覚しにくいようなシステム

距離の弁別機能について、Proxemic Interaction では対人距離の考えに基づき空間を4つのエリアで分離する事が多い。そのためシステムで3つの境界線を設定できれば、音波の届かない範囲を一つのエリアとして考える事で空間を4つのエリアに分離する事が可能である。また距離についても対人距離の最も遠い境界が3.6mである事から、4m程度まで分離が可能なら十分であると考えられる。外部デバイスを利用しない事について、実装を Android スマートフォンで行う事で将来 Proxemic Interaction のシステムを構築する時に開発段階で気軽にシステムを試すプロトタイプでの利用が可能となる。簡単なテキスト情報の送信について、各企業が展開する音響通信サービスでも音響 ID など専用の短い ID を利用し、無線技術と組み合わせた利用を想定している。そのため本研究でも、URL 程度の情報が送れる事で新しアプリケーションの実現に結び付けられるのではないかと考えた。非可

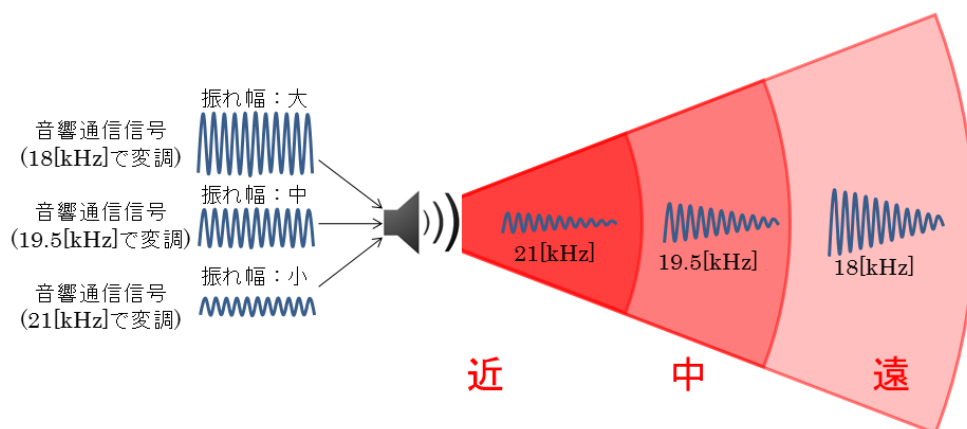


図 3.1: 音圧の違いによる距離の制御

聴の通信について、音波を利用するため方法によっては不快な音が発生する可能性がある。この影響をなるべく抑えるような通信の実現が必要である。

### 3.2 システム構成

本研究では情報端末間の距離を知るために、異なる3つの周波数で変調した音響通信の信号を用いる。図 3.1 のように各周波数で変調した信号の振幅を変化させ、信号の到達距離に差をつける。受信側では現在、どの信号を受信できているかという情報から、送信側との距離を推測する。

信号が無指向性の場合、信号の音圧は距離の3乗に反比例して減衰するが、指向性がある時、例えば平面波では距離の2乗に反比例する。そのため距離と音圧の関係は事前に学習する必要がある。本研究では事前のキャリブレーションにより、一定範囲の距離で自由に距離の境界を決められるようなシステムを目指す。

受信側はモバイル端末を想定し、送信側はモバイル端末または一般的なスピーカーを繋げたPCを想定する。実験では送信機として Android スマートフォン、PC に接続されたスピーカーを利用した。

### 3.3 システムの利用

本システムは様々な Proxemic Interaction アプリケーションのインフラとして活用できる。例えば関連研究で述べた Public Ambient Display では、ディスプレイから専用の音を発する事で、スマートフォンを持った利用者に距離に応じた情報の提示をする事が可能である。ただ本手法だけでは利用者の移動方向などは検知する事が出来ない為、機能は限定的となるがシステムのプロトタイプ作成を気軽に行えるようになる。

またディスプレイに限らず、例えば展示会場のポスターの裏にスピーカーを設置する事

### 第3章 提案手法

---

でポスターに近づいてくる利用者に距離に応じたコンテンツを提示して興味を引くといった利用も考えられる。

またスマートフォン同士の利用では、スマートフォンが一定距離以内に近づいた事を認証情報として、距離に応じて送信可能なコンテンツを制御するといった利用も考えられる。例えば距離が離れている時には簡単なプロフィールしか送信できないが、近づくと画像などのコンテンツ、より近づくと電話帳などの個人情報も送れるようになるアプリケーションが考えられる。

その他にも音圧の制御によっては、タッチセンサーのような利用も可能である。音響NFCでもあったように、スピーカーにスマートフォンのマイクロフォンを触れる事で認証が完了するシステムが考えられる。

以上のように、本システムは様々なアプリケーションのインフラとして利用が考えられる。

## 第4章

---

# 実装

本章では第2章で説明した基礎技術を用いて、実際に実装したシステムについて説明する。送信波形の作成はPC上でMatlabを用いて作成した。受信側のプログラムはAndroid上で実装した。以下では各プログラムの利用法について送信側と受信側に分けて説明する。また実験の過程で幾つかのスピーカーでは17kHz以上の音を正しく送信できない事がわかった。そこで実際に試した幾つかのモバイル端末やスピーカーについても説明する。

### 4.1 送信側の実装

図4.1に音響通信プログラムの全景を載せる。送信側での処理は、まず送りたいデータに誤り訂正の為に冗長ビットを付加する。次にM系列を利用したプリアンプルを付加する。得られたデジタルデータをASK変調で変調する。このうちプリアンプルとASK変調について以下で詳しく説明する。

#### 4.1.1 M系列を利用したプリアンプル

本研究では送信したい信号の前にプリアンプルを付ける事で、信号の検波と同期を自動で行えるようにした。プリアンプルは周期7のM系列を繰り返したものを利用した<sup>1</sup>。このデジタルデータを1kHz周期のASK<sup>2</sup>で変調した時、プリアンプル部分の信号は1/7kHzの周期信号となる。そのため受信側で信号の自己相関関数を計算すると、1/7kHzの倍数にあたる部分でピークが立つ。これを検出する事で、受信側は信号が送信されている事を確認できる。

同期については信号が検出された時、事前に受信側に登録してあるプリアンプル解答データとの相互相関関数を計算する事で位置を決定した。

---

<sup>1</sup>“1011100”の繰り返し

<sup>2</sup>1シンボルあたり1/1000[s]で変調

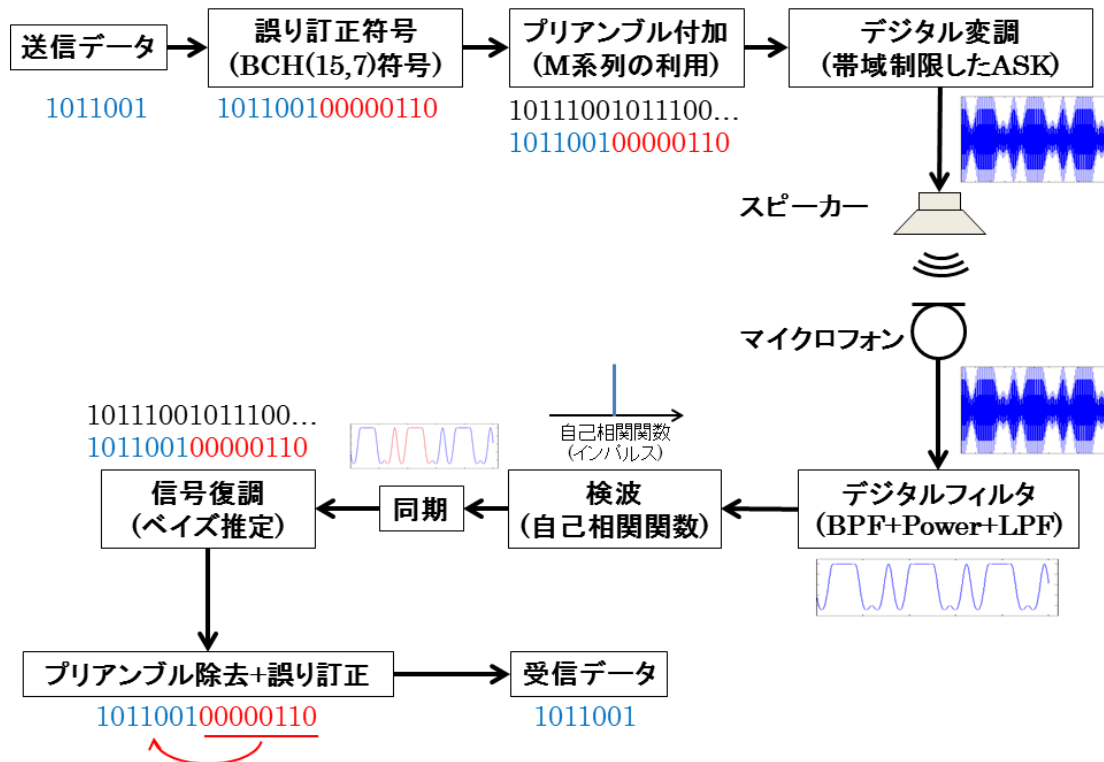


図 4.1: 音響通信システム全景

#### 4.1.2 帯域制限をした ASK 変調

人の可聴域は 20~20kHz とされているが、20代の人でも 17kHz 以上の音が聴こえる人は多くない。そのため本研究では通信を 17kHz~24kHz の範囲で行う事で、非可聴な通信の実現を目指した。7kHz という非常に限られた帯域での通信となるため、変調技術では幾つかの工夫を行った。<sup>3</sup>

実験では始め、効率の良い変調方式として PSK を利用した。しかし PSK では信号の帯域が広がってしまい、送信時に可聴域の音が発生してしまう事がわかった。そこで通信の効率は下がってしまうが、ASK により通信を行う事にした。

しかし矩形波を搬送波にのせて送信する従来の ASK では、矩形波の帯域の広がり原因となり可聴域の音が発生してしまう事がわかった。そのため、本研究では図 4.2 のように矩形波の立ち上がり、立ち下り部分に sin 波の一部をかける事で帯域幅 1kHz という非常に狭い帯域で通信を行う事に成功した。

実験ではさらにこの 1kHz で帯域制限した信号を周波数軸上で 3つ並べたものを利用した。それぞれの信号が OFDM のサブキャリアの様な働きをする為、帯域全体を利用した信号と比較し遅延波の影響を軽減する事が出来た。

<sup>3</sup>電磁波を用いた無線では通常、数 MHz の帯域を用いて通信を行う。

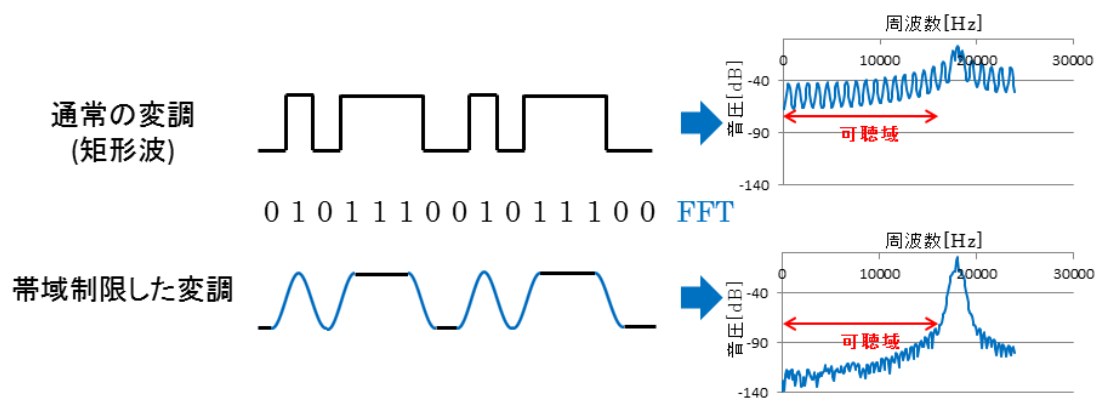


図 4.2: 帯域制限をした ASK

## 4.2 受信側の実装

受信側ではまず受信した信号に BPF、パワースペクトル計算、LPF の処理を行う。この処理により搬送波が取り除かれ、デジタル信号を ASK により変調した信号が得られる。プリアンプを用いた検波、同期処理の後、信号の復調を行う。信号の復調にはベイズ推定を利用した。そして得られたデジタルデータからプリアンプを除去したのち、BCH(15,7) 符号による誤り訂正を行う。最後に 3 ビット以上の誤りがない事を確認し、受信データを取得する。これらの処理のうち、ベイズ推定を用いた信号復調について説明する。

### 4.2.1 ベイズ推定を用いた信号復調

ベイズ推定を利用する時、推定するクラスと利用する特徴量を定める必要がある。本研究ではクラスとして 2 ビットのシンボルからなる 4 つのクラス (00,01,10,11) を想定した。また特徴量は図 4.3 で示す計算から値の平均と傾きの 2 種類を用いた。

クラスを 1 ビット 2 クラスではなく 2 ビット 4 クラスとした理由として、今回前節で述べた帯域制限をした ASK を利用した影響で、同じシンボル “1” でも前のシンボルが “0” と “1” で波形は大きく違う。この違いを正しく読み取るため、今回は上記の特徴量を用いた 2 ビット 4 クラスにて推定を行った。

また本来は学習データを受信したデータで逐次更新していく事が望ましいが、今回は時間の都合から事前学習による特徴量の利用に留めた。学習は既知の 76200 シンボルの受信データから作製した。

## 4.3 実験で利用可能なスピーカーについて

実験の過程で幾つかの Android 端末やスピーカーで実験音を再生したところ、デバイスによっては可聴音が発生してしまう事に気が付いた。これはスピーカーの出力特性が周波数軸上で均一でなく、高周波では入力信号に対し出力信号が非線形に歪んでしまうからだ

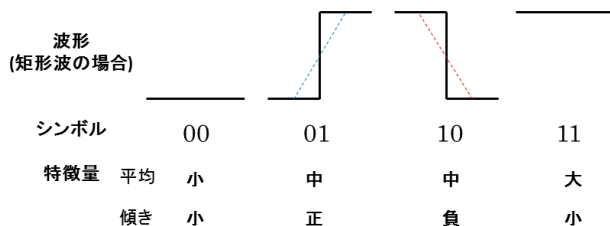


図 4.3: 波形復調に用いたクラスと特徴量

表 4.1: 高周波入力での可聴音発生の有無

デバイスの種類	機種名	メーカー	可聴音発生の有無
スマートフォン	Galaxy J (SC-02F)	Samsung	発生しない
	Xperia Z1f (SO-02F)	Sony Mobile Communications	発生しない
	Xperia Z1 (SOL23)	Sony Mobile Communications	発生
	Nexus 4	LG エレクトロニクス	わずかに発生
	Nexus 5	LG エレクトロニクス	わずかに発生
	Nexus 7 (2012)	ASUS	発生
	iPhone 5	Apple	発生しない
PC 用スピーカー	Companion 2	BOSE	発生しない
	BSPKMA02SVA	Buffalo	発生
	SP-A220	Victor	発生
PC 内蔵スピーカー	Let's note CF-S10	Panasonic	発生しない

考えられる。そこで実験に用いる端末を決定する為に、幾つかの端末やスピーカーで 17kHz ~ 21kHz の純音を再生し可聴音発生の有無について調べた。結果を表 4.1 にまとめる。

結果を見ると同じメーカーでも可聴音が発生する物としない物もあり、利用可能な機器を一概にいう事は出来ない。そのため今後サービスとして利用する場合には、事前にその機器が 17kHz 以上の高周波に対応しているか機器毎に確認する必要がある。この結果を踏まえ、実験ではスマートフォン端末は Samsung 社の Galaxy J、PC 用スピーカーは BOSE 社の Companion 2 を利用した。



## 第5章

---

# 実験

提案したシステムにより、実際に距離を分ける事が可能か幾つかの実験を行った。一つ目の実験は受信した波形をPC上で処理し、今回の手法で最大どの程度の性能が出せるのかを確認した。二つ目の実験では、スピーカ-の出力特性を確認した。三つ目の実験では、Androidで実装したシステムでどの程度の性能を出せるのか確認した。

### 5.1 手動同期によるシステム最大性能の評価実験

まずPC用数値解析ソフト Matlab を用いた手動同期による実験を行った。Android スマートフォンのプログラムはリアルタイム処理となっており、通信が上手くいかない時に原因の究明が難しい。そこで最もエラーが起こりやすい、自己相関関数による波形検出と時間同期の処理を手動で行い手法の最大性能を確認した。

#### 5.1.1 実験条件

図 5.1 のような装置を組み立て、Android スマートフォンのマイクロフォンがスピーカ-に向くように配置した。実験は人の居ない静かな室内で行った。

実験手順は以下の通りである

- 事前に PC で実験波形を作製
- 作製した実験波形を PC に接続したスピーカ-から送信
- Android スマートフォンの録音アプリにより波形を取得
- 録音した音を PC に移し、Matlab で解析
- 以上の処理を実験波形の振幅を変更し複数回計測
- スピーカ-からの距離が 10cm、50cm、1m、2m、3m、4m、5m それぞれの場合で計測
- 搬送周波数が 18kHz、19.5kHz、21kHz のそれぞれの場合で計測しグラフを作成した

Matlab では Android スマートフォンで実装したのと同じ処理を行うプログラムを作成し、解析を行った。

実験波形は次のような構成である。

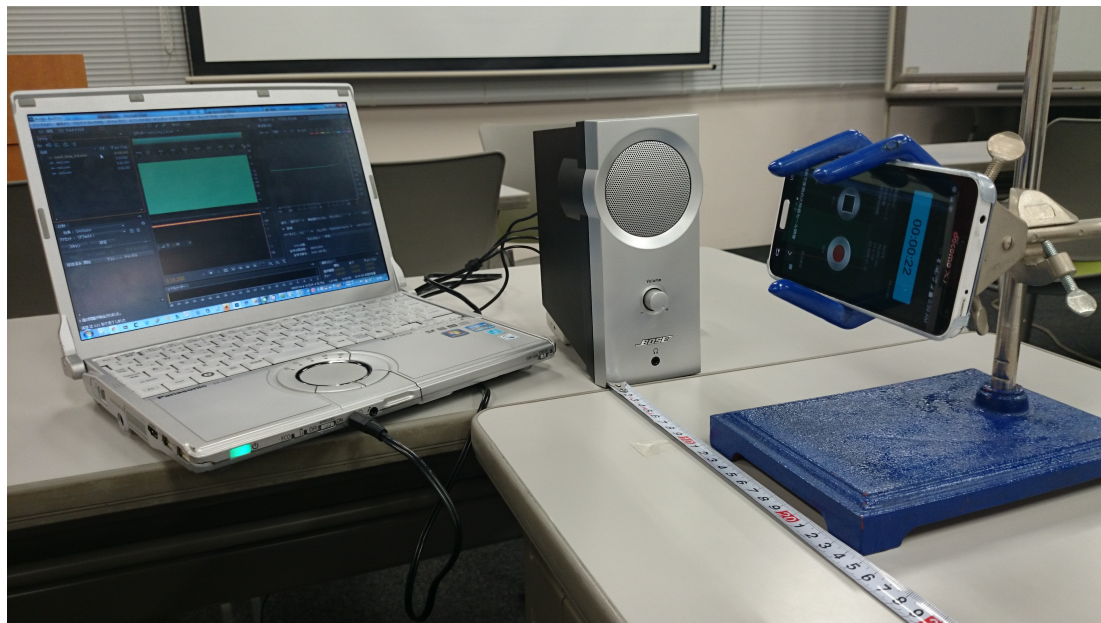


図 5.1: 実験装置

表 5.1: 実験で利用した機器

Android スマートフォン	Galaxy J
PC	Let's note CF-S10
スピーカー	Companion 2

- プリアンブルとして 140 ビット分のデータを作成
- プリアンブルの後にプリアンブル終了検出用のビットを 7 ビットを挟み、15 ビットの送信ビットを挿入
- 上記の計 162 ビットを 1 パケットとし、これを 100 回繰り返し送信して受信率を計算
- およそ 92bps の通信

図 5.2 に実際に利用した信号の送信波形を載せる。

また利用した実験に利用した機器は表 5.1 の通りである。

### 5.1.2 実験結果

実験結果を図 5.3 に載せる。図の (a)、(b)、(c) が誤り訂正をしなかった場合の受信成功率、(d)、(e)、(f) が 2 ビット誤り訂正をした場合の受信成功率である。

また実際に実験波形を送信してみたところ、PC 側での出力電圧の大きさとスピーカーから出力される音圧の関係が線形で無い事に気が付いた。そこで PC 側で出力電圧の調整を行い、受信音圧との関係を見ながら適切と思われる出力で値を計測した。出力電圧の調

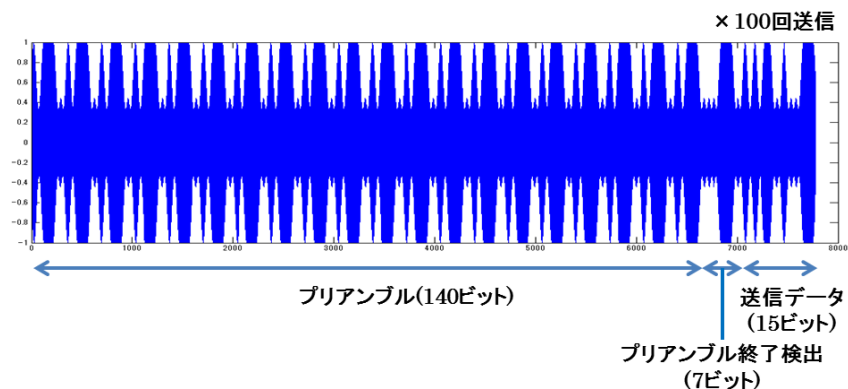


図 5.2: 送信波形

整は実験波形の振幅を調整する事で行い、音声ファイルの最大振幅を1とした時の振幅を0.01、0.005、0.001とした計4種類の音についてそれぞれ計測を行った。図に示したdBは、振幅1、距離10cmの時の受信音圧(システムの最大音圧)を基準とした実際の受信音圧(距離10cm)の相対値である。値が絶対基準量であるdB<sub>SPL</sub>(Sound Pressure Level)では無い理由として、今回利用した周波数帯域が17kHz以上という高周波帯域であるため、通常の騒音計では正しいdB<sub>SPL</sub>が測れなかった為である。スピーカー出力の非線形性については次の実験でより詳しく説明する。

また18kHzの実験は各点3回計測を行い、19.5kHzと21kHzは各点1回ずつの計測を行った。

以下でグラフについて考察する。まず距離の弁別可能性について、例えば図5.3の(d)のグラフでは可能であると考え。グラフでは例えば0dBのグラフの packets 到達率は3mの地点まではほぼ100%だが、4mになると急にほぼ0%となる。他のグラフについても同様にある距離までの packets 到達率はほぼ100%だが、次の距離で大きく packets 受信率を下げている。この性質を用い、例えば1秒間に送信された6 packets 中5 packets 未満しか到達しなかった場合 (packets 受信率83%以下) その距離の範囲外と言う事が可能である。(d)の4つのグラフの場合、音圧の高い方から順に3m、2m、1m、10cm 辺りの境界を判別する事が可能である。残りのグラフについても同様の結論が言える。

また音圧について、例えば図5.3の(d)について各グラフの音圧は0dB、-19dB、-26dB、-34dBとなっている。0dBと-19dBのエネルギー差は約79倍、-19dBと-26dBの差は約5倍、-26dBと-34dBの差は約6倍となっている。このように距離を弁別可能にするにはかなりの音圧差をつけなければならない。

## 5.2 スピーカー特性の確認実験

前節でも述べたように、実験の過程でスピーカーへの入力電圧と出力音圧の関係が線形で無い事に気が付いた。そのため具体的にどのような特性となっているのかを実験で確認した。

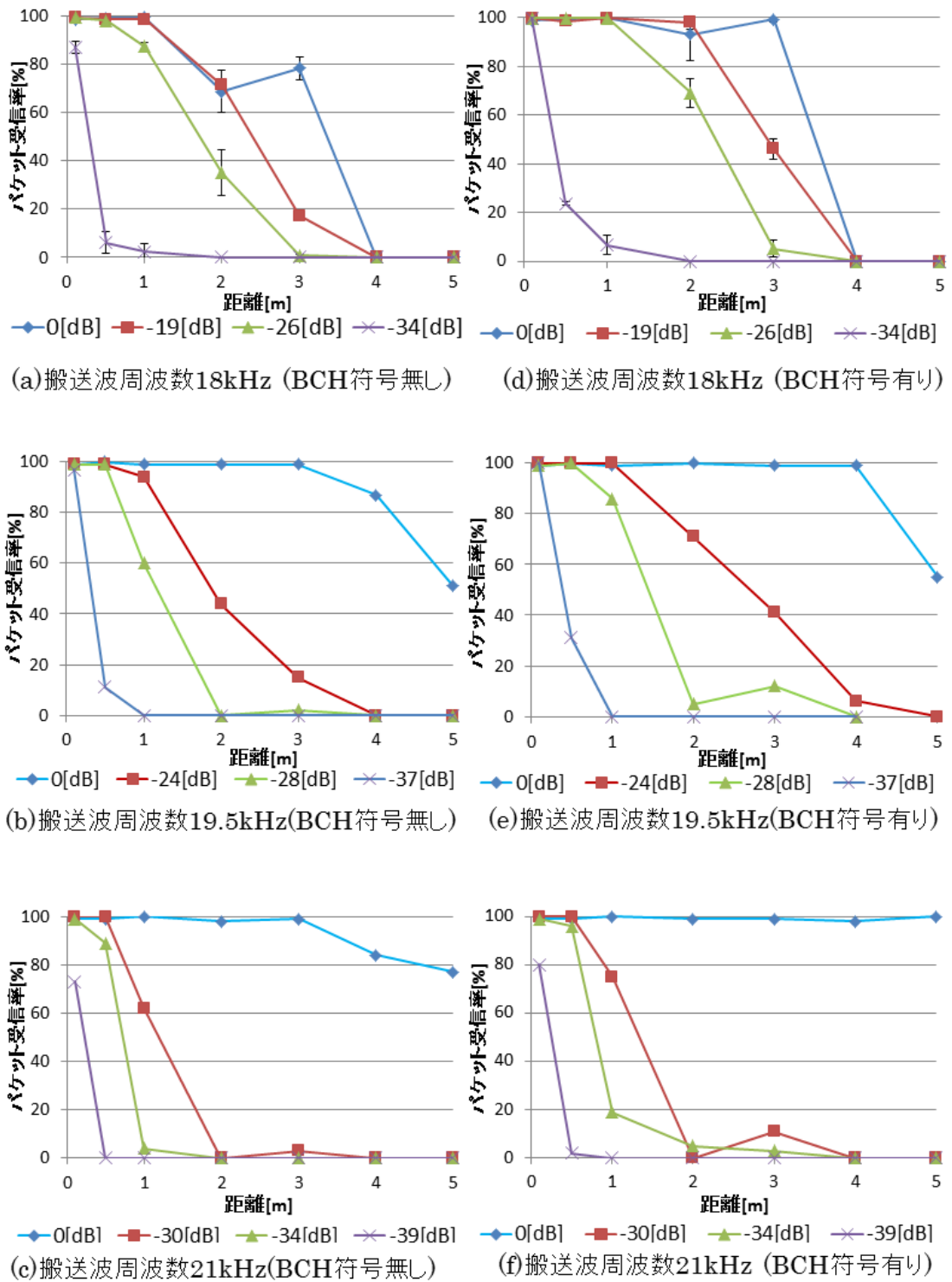


図 5.3: 手動同期の実験結果 ((a)~(c) : BCH 符号無し (d)~(f) : BCH 符号有り)

### 5.2.1 実験手法

実験ではPC側の出力電圧の制御法として、再生するwavファイルの振幅を段階的に変更した階段状の実験波形を作成し、再生した。受信側では前節と同様に10cmの距離に置いたAndroidスマートフォンで音を受信しPCで解析を行った。またこの手法では入出力時のAGC(Automatic Gain Control)の影響などを考慮する事が出来ない。しかし今回は、PC、受信用Androidを含めた系全体としてのデジタル入力と出力がわかれば、アプリケーションとしての利用には十分である。今後キャリブレーション処理で事前学習を行う場合にも、この点には注意する必要がある。

### 5.2.2 実験結果

図5.4に結果を載せる。横軸はどちらも入力信号振幅の2乗で、縦軸は上が音圧の実測値、下がスピーカーからの距離が10cmの時の音圧を基準としたdB表記である。ただし実測値とは得られたwavファイルから直接計算された値で、実際の音圧に比例すると考えられる。

グラフを見ても明らかなように、全体で入力と出力の関係は線形では無い。だが下の図を見ると、振幅の2乗の値が0.01~0.00001の範囲(振れ幅0.1~0.001)の範囲では線形に近い値となっている。そのためアプリケーションとして利用する時にはこの範囲を利用するのが適切と考えられる。

またグラフの周波数特性についても見てみる。上の図を見ると周波数が高周波になるにつれ、信号の最大入力の時の出力音圧は強くなっているが、振幅が小さくなるにつれ急速に減衰している。これを下のグラフで見ると19.5kHz、21kHzのグラフはそれぞれ18kHzのグラフを右に平行移動した形となっている。この結果は図5.3のグラフで、19.5kHz、21kHzでは大きな振幅の信号は18kHzより遠くに届いているのに対し、小さな振幅の信号は18kHzと比べ近い距離までしか届いていない事と一致する。

## 5.3 Android 端末を用いたリアルタイム通信の評価実験

最後にAndroidを用いたリアルタイムプログラムの実験を行った。手動同期の実験と同様、18kHz、19.5kHz、21kHzそれぞれの搬送波周波数の時について実験を行った。さらに今回は前の実験で得たスピーカー特性を元に、各搬送波での発信音圧が同じになるように調整した。

### 5.3.1 実験手法

実験は手動同期での実験の場合と同様に、スピーカーとスマートフォンの距離が10cm、50cm、1m、2m、3m、4m、5mそれぞれの場合でのパケット受信成功率を求めた。またリアルタイムプログラム実装上の都合、パケットのプリアンブル部分を700ビットに伸ばし、100パケットを送信中何パケットが正しく受信出来たかを計算した。

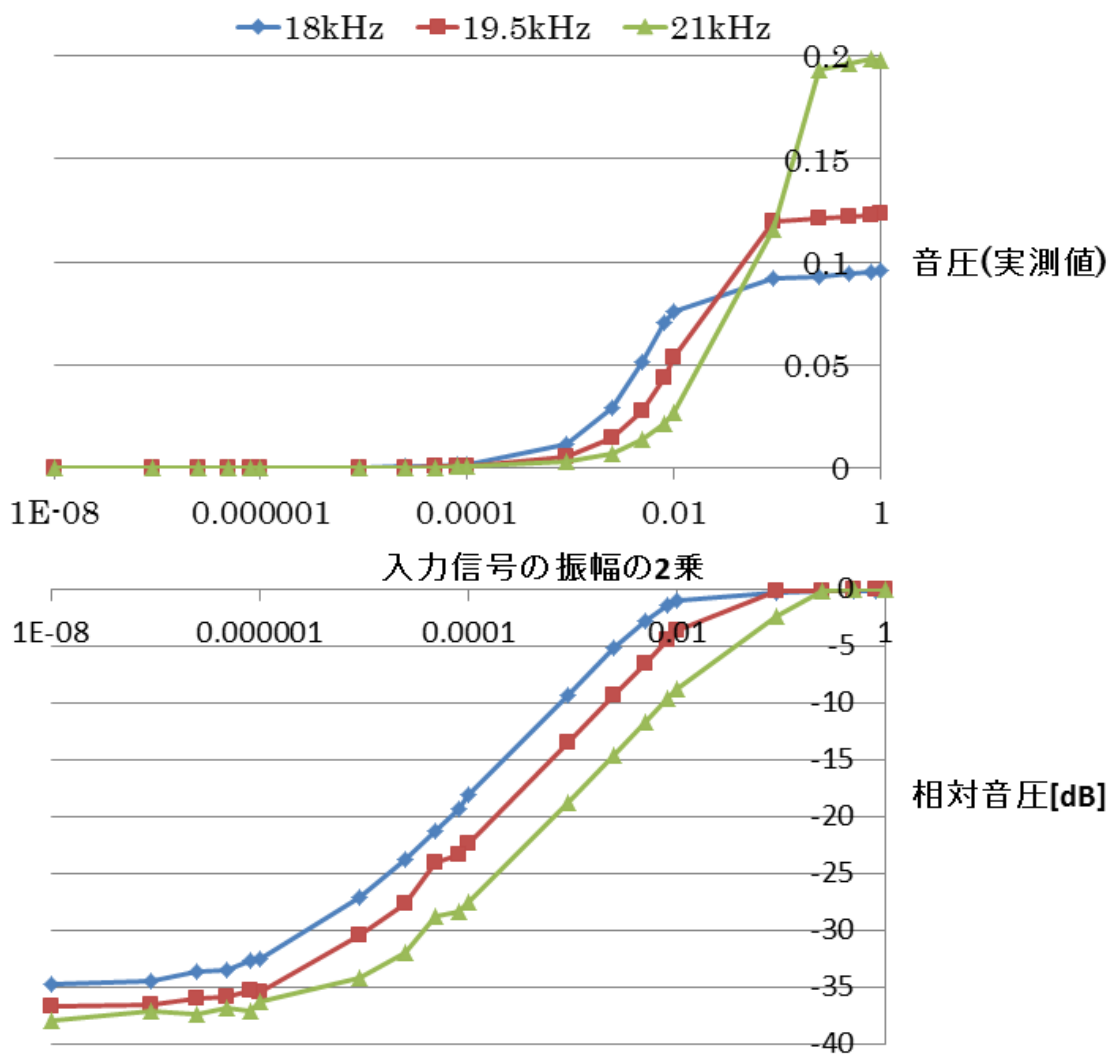


図 5.4: スピーカーへの入力電圧と出力音圧の関係 (上: 音圧の実測値 下: スピーカーからの距離が 10cm の時の音圧を基準とした dB 表記)

### 5.3.2 実験結果

実験結果を図5.5に載せる。図の横軸は距離、縦軸は受信成功率である。手動同期と比較すると全体的にパケット受信成功率は低い。手動同期では受信可能範囲ではほとんど100%の受信成功率であったのに対し、リアルタイムプログラムでは最大でも16%程度に留まっている。ここ原因として、リアルタイムプログラムでは通信の同期に失敗している可能性が挙げられる。本プログラムでは、解答波形との相互相関関数が最も大きい場所を同期の基準としている。しかし、空間の伝達により信号波形は歪んでいるため、これが原因で同期位置がずれた可能性がある。同期がずれるとそれ以降の信号復調全体がずれるため、受信率は大きく低下する。

このように受信成功率は全体的には低いけれども、本来の目的である距離の判別は可能である。仮に受信成功率4%を越えた時、その範囲に入っていると仮定すると、18kHzでは10cm、3m、4mの地点、19.5kHzでは10cm、1m、3mの地点、21kHzでは50cm、3mの地点で仮想的な境界を引く事が可能である。また各周波数毎の分離可能距離を比べてみると、手動同期の時と比べ周波数毎の違いが小さくなっている事が確認される。この事からスピーカー特性の推定が機能している事が確認される。未だに残る周波数毎のズレは、特性をさらに厳密に推定する事でさらに縮まると予想される。

また18kHzの実験では、手動同期の時と同じ音圧で信号を送信している。にもかかわらず、リアルタイムプログラムの方がより遠い距離までパケットを受信できている。これはスピーカーの指向性が影響していると考えられる。実験中何度か、スマートフォンを置く位置のわずかなズレが受信率に大きな影響を与える現象が確認された。これはスマートフォンがスピーカー指向性の範囲から出てしまったため起きたと考えられる。手動同期の実験では一度音を取ってから解析を行うため、この指向性の範囲外で録音された音を実験音として解析してしまう危険がある。これは特にスマートフォンが遠くに置かれた時に起きる可能性がある。リアルタイムプログラムでは波形を見ながら置く場所を変えられるため、このような大きな誤差は生じ辛い。今回はこの違いが実験の結果として表れたのではないかと考えた。今後システムを構築する上で、このスピーカーの指向性の問題も考えて行く必要がある。

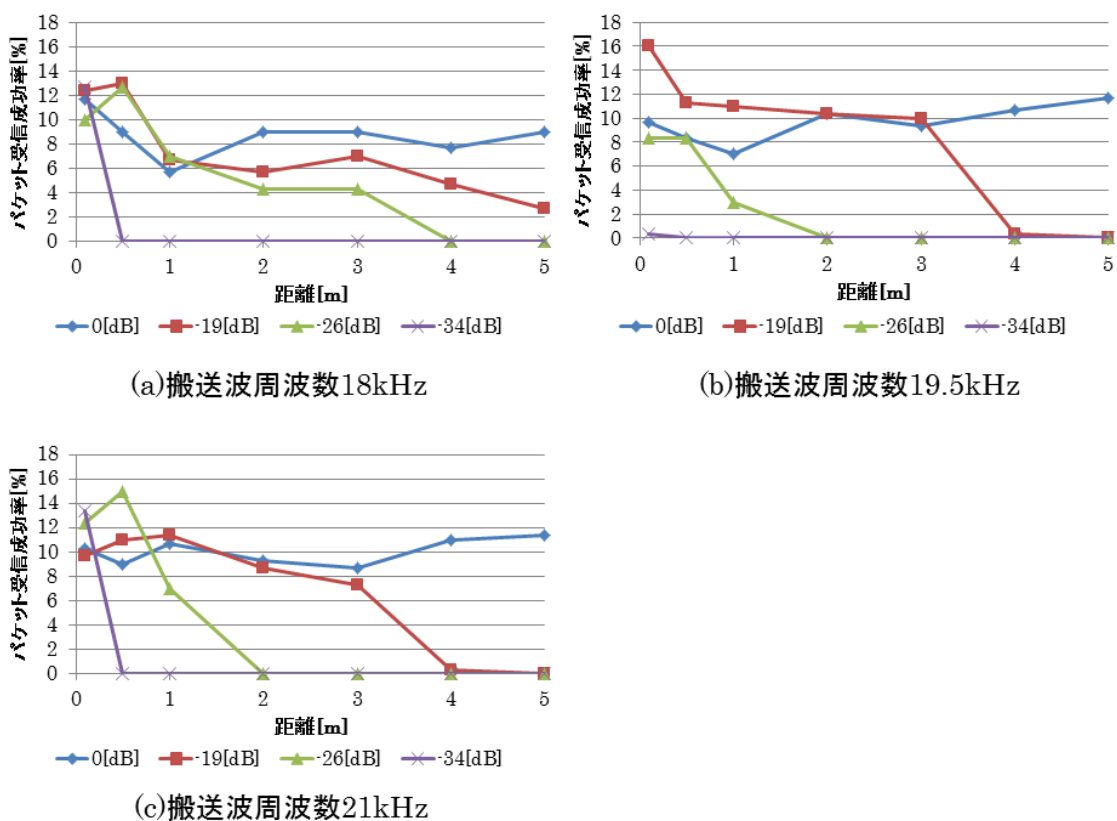


図 5.5: Android を用いたリアルタイムプログラムによる実験結果



## 第6章

---

# 考察

### 6.1 システムの実現可能性について

前章の実験において、Android でシステムを実装したがまだ実用には遠い結果となった。しかし、手動同期を用いたシステムの最大性能は十分実用に足る結果となった。この点を踏まえ、システムを実用化するために行うべき事についてまとめる。

Android のリアルタイムシステムと手動同期の手法で異なる点は、信号の自動検波と自動同期の有無である。そのため、Android システムのエラーの原因はこの点にあると考えられる。

まず信号検波について、本研究ではプリアンプルに入れた周期7のM系列の自己相関関数を検出する事で行っていた。実装では受信したデジタル信号を2048点毎(サンプリング周波数が48kHzなので0.043秒刻み)に区切り、その自己相関関数を計算し、プリアンプルの周期に対応する位置(1ビットが48点で表されているので<sup>1</sup>、336(=7\*48)点目)の値が閾値(実装では0.8)を越えた時を記録する。これが5回連続して閾値を超えた時、始めて信号が来たと認識する。つまりプリアンプル信号が最低でも8192(=2048\*4)点連続しなければ信号の検出は起こらない(5回目のブロックから処理に入るので4回目まで)。これをビットに表すと約170ビット(=8192/48)となる。つまり信号が受信され始めてから最低でも170ビットの間は仮に受信信号が来ても処理を行う事が出来ない。今回の実験では1パケットあたりのプリアンプルを700ビットとしているのでこの検出が間に合わない事はそこまで多くは無かったと考えられるが、エラーの原因には成りうる。現在は最終的な受信シンボルとなる15ビットを正しく受け取る事に重点を置き、少し冗長な処理となっているが、今後改善していく必要がある。

次に同期処理について説明する。実装では上記の信号検出終了後、受信側で持っているプリアンプル1周期分の信号(336点)との相互相関関数を現在受信している信号の頭からシフトしながら順に計算する。この中で値が最大となることを信号の開始点とし、これ以降48ビット毎に値を読んでいく。恐らくここでの処理に問題があると考えている。信号開始位置の推定のずれは、これ以降の受信ビットに大きく影響を与えてしまう。しかし現在の方法では受信波形の歪みには対応できない。これに対処する方法として2つのアプロー

---

<sup>1</sup>1ビットは1kHzの周期で送られ、信号は48kHzサンプリングであるため

チが考えられる。一つは信号の歪みを取り除いた上で再度この処理を行う方法である。このような方法の一つとして、例えば適応フィルタを利用した伝送路の推定手法がある。もう一つはそもそもプリアンプルの信号波形を変えてしまい、より同期の取りやすい方法を利用する事である。例えば関連研究で述べた橋爪らの距離計測手法は、このような正確な時間同期にも利用可能である [32]。ただ、どちらの方法にも欠点がある。適応フィルタを用いた方法は計算量が大幅に増える事や、フィルタの安定化の為に多くの知見が必要である事。橋爪らの手法は超音波で利用している方法を、可聴域範囲内で利用可能か不明な点や、利用により可聴音が発生してしまう可能性がある事が挙げられる。また他にも無線通信の様々な知見も利用できる可能性がある。

## 6.2 キャリブレーション処理について

仮に Android の受信成功率を高める事に成功した場合、システムとして利用するにはキャリブレーション処理について考えなければならない。目的とするシステムでは、どのような情報端末上でもすぐに利用できるようになる必要がある。そのため、各環境でのスピーカー特性などを自動で補正する処理が必要である。以下ではこのキャリブレーション処理について考える。本研究で目的とするシステムでは、次の三点についてキャリブレーション処理が必要となる。

- スピーカー特性の補正
- 入力した距離に応じた送信音圧の決定
- 音響通信のためのパラメータ情報

スピーカー特性の補正では実験の章で行った“スピーカーの入力電圧と出力音圧の関係”と同様の処理を自動で行う必要がある。この処理により、周波数の違いによる出力の違いや、入力信号との非線形性を解消する事ができる。具体的な方法として、受信側をキャリブレーションモードに切り替え、送信側は受信側と事前に共有してある測定用階段状信号を送信する。受信側でスピーカー特性が計算され、必要な情報のみ音響通信で送信側に返される。また実験では 23 秒の実験音を利用したが、5 秒～10 秒程度の信号で十分だと考えられる。

次に入力した距離に応じた送信音圧の決定だが、これにはまず利用者が境界としたい距離に受信端末を置く。送信側は徐々に音圧を変化させて、受信端末が最適と判断した時の音圧を記録する。この処理を 3 つの境界それぞれで行う必要がある。またこの処理では受信側が送信側に最適な時を伝える必要がある。この方法として無線などを利用していても良いがなるべく別の手段を利用しない方が好ましい。そのため具体的な方法として例えば、受信側は送信側から受信した音響信号をエコーとして返す方法などが考えられる。送信側は受信側がエコーを返し続ける限り信号音圧を下げ続け、エコーが止まった時点を最適音圧として記録する。これにより受信側と送信側が他の情報伝達手段で繋がっていなくても、互いにキャリブレーションを行う事が出来る。

最後に音響通信の為のパラメータ情報だが、これは音響通信で事前に共有すべき幾つかの情報を受信側と送信側で共有する為に利用される。パラメータ情報として例えばプリアンプルに関する情報、BCH 符号に関する情報、パケット長に関する情報などが挙げられる。これらは事前に登録し、それを利用する方法でも問題は無いが、この処理を加える事で利用環境によって最適なパラメータを調整する事が可能となる。例えば伝達環境が非常に良い時は誤り訂正符号のビット数を減らし、通信速度を向上させるなどの処理が可能である。この情報の共有には音響通信を利用するのが良いと考えられる。事前にデフォルト値としてパラメータを決めておき、最初はその情報を基に音響通信を行い、前二つのキャリブレーションの結果を考慮しながらパラメータを共有する事が可能となる。

以上が必要なキャリブレーション処理だが、これに加え適応フィルタを用いた伝送路学習を加える事も可能である。一番最初のスピーカー特性の補正では、送信側、受信側が互いに既知の測定用信号を送信している。この信号が空間を伝わりどのように歪んだかを適応フィルタを利用して解析する事が可能である。これにより、空間の伝達関数を表す FIR フィルタを形成する事が出来る。この逆フィルタを作成し、これ以降受信する全ての信号をフィルタに通す事で波形の歪を軽減する事が可能となる。これは前節の同期精度の向上や信号復調精度の向上につながる。また過去に自身で行った実験でも、PSK 変調した音響通信のパケット受信率を向上させる事に成功している。

最後にユーザーが行うべき行動をあらためて以下にまとめる。

1. スピーカー特性補正の為、10cm 程度離れた場所に送信端末、受信端末をそれぞれ置き受信端末をキャリブレーションモードとする。
2. 送信端末から測定用信号を送信すると自動で受信側から測定結果が返される。(またこの時同時に適応フィルタによる伝達関数推定も行われる)
3. ユーザーは境界として設定したい距離に受信端末を置き、再び受信端末をキャリブレーションモードとする。
4. 送信側から測定音を送信し、一定時間後に自動的に終了する。この処理を3つの境界それぞれで行う。

また音響通信のパラメータ情報のやりとりは1回目か2回目のキャリブレーション処理のどちらかで、裏で自動的に行われている。既に伝達関数の計算が終わっている2回目の方がより適切である。このようにユーザーは計4回のキャリブレーション処理のみでシステムを使えるようになる。

### 6.3 3つの周波数の送信問題

今回の実験では各周波数ごとに個別に実験を行ったが、実際のシステムではこれらを同時に送信する必要がある。しかし実験の過程で2つ以上の信号を1つのスピーカーから同時に出すと、スピーカー出力の非線形性の問題から可聴音が発生してしまう事に気が付いた。現時点で信号処理によりこの可聴音を取り除く方法は見付けていない。そこで実際のシステムでは図6.1に示すように時分割多重 (TDM) を行った信号波形を送信する必要があ

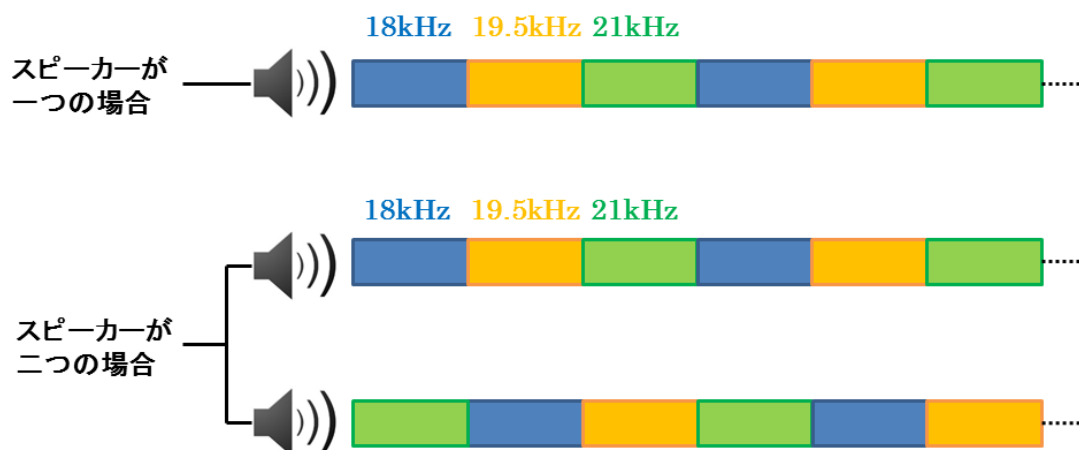


図 6.1: 時分割多重による信号の送信

る。またシステムによっては2つのスピーカーを利用可能な場合もあり、この場合はステレオ音源を用いて各周波数の音が被らないように交互に送信する。この時、通信の速度はスピーカー1つの時は1/3、2つの時は2/3に落ちてしまう。そのため、わざわざ3つの周波数に分けなくても3つの帯域を全て使ったより高速な通信を使いその波形の減衰から距離を計測すれば良いという意見もある。しかし、あえて帯域を3つに分けるメリットもある。通信を低速な帯域3つに分割する事で、OFDMのサブキャリアと似た働きにより音響通信ではしばしば問題となるマルチパスフェージングの影響を抑制できる。これにより信号処理などの手間も減らす事が出来る。

## 第7章

---

# 結論

### 7.1 まとめ

本研究では音響通信を利用し、Proxemic Interactionのためのインフラシステムの構築を目指した。Proxemic Interactionでは距離情報を取得する事が非常に重要で、これまでの研究ではカメラや距離センサー、深度カメラなどの外付けの測定器を用いて必要な情報の収集を行っていた。本研究では音響通信と呼ばれる音を用いて通信を行う技術に注目し、外付けの計測機を用いずに距離を計測する手法を提案した。外付けの計測機を用いない事で、気軽にシステムを構築できるようになり、アイデアが思い浮かんだ時にすぐにプロトタイピングを行えるようになる。そして次の4つの機能を備えたシステムの構築を目指し、Androidでの実装を行った。

- 距離の弁別機能
- 外部デバイスを利用しないシステム
- 簡単なテキストが送信可能
- 非可聴の通信

作製したシステムの評価実験を行いPC上で実装した手動同期のプログラムではシステムの実現可能性が示された。しかしAndroid上で実装したリアルタイムのプログラムでは、パケット受信率が最大でも16%程度とあまり良い結果が得られなかった。原因として受信波形の歪みが通信の同期に影響を与えている事が考えられる。またキャリブレーション、複数周波数を同時に送信する問題について考察を行い、今後のシステム実装の方向性を示した。

### 7.2 今後の課題

4つのシステム要件それぞれについて、今後の課題と利用が考えられる技術について述べる。

### 7.2.1 距離の弁別機能

今回の実験は全て人の居ない静かな部屋で行ったが、実際の利用では様々な雑音の影響が考えられる。利用している周波数が高周波であるため元々雑音は入りにくいだが、受信音圧が変わる可能性もある。雑音抑圧処理も考慮しつつ、環境についての考察も今後行う必要がある。

また、スピーカーの指向性も距離弁別能力を下げる要因となる。今回の実験でもスピーカーの指向性が原因とみられる値の揺らぎはたびたび観測された。今後はこれらの点についても考えなければならぬ。

### 7.2.2 外部デバイスを利用しないシステム

外部デバイスを利用しない場合必然的に備えられたスピーカーとマイクロフォンでの利用となる。しかし今回の研究で、幾つかの端末やスピーカーでは入力信号が高周波にも関わらず意図しない可聴域の音が発生してしまう問題が観測された。これらの問題は端末依存であり、一概に解決策を見付ける事は難しい。

想定される解決法の一つとして、適応フィルタを用いて端末の特性を打ち消す手法がある。事前に推定された端末の特性の逆特性を入力信号に掛ける事で、送信時にかかる歪みが軽減される。この手法の評価も今後の検討課題である。

### 7.2.3 簡単なテキストが送信可能

今回、音響通信の通信速度について多く議論はしなかった。しかし実際のシステムでは非常に重要である。具体的には数十 byte の URL を 1,2 秒程度で送れる事が望ましい。通信速度を上げる方法として、無線技術で利用される様々な技術の活用が考えられる。例えば MIMO 通信やスペクトル拡散法などの変調技術を用いた通信の高速化が考えられる。またシステム設計でプリアンブルを少なくしたり、符号化を工夫するなどの手法も考えられる。

### 7.2.4 非可聴の通信

信号の可聴性については「外部デバイスを利用しないシステム」の節でも述べたように、スピーカーの特性が大きく影響する。先に述べた適応フィルタを用いた手法は有効であると考えられる。

また、周波数の設計についても今回は3つのキャリア周波数を用いたが2つや4つ、もしくは1つの場合についても検討する必要がある。

# 謝辞

---

本論文を執筆するに当たり、常日頃からご指導、ご鞭撻頂きました指導教官の相田仁教授に深く感謝致します。

矢谷浩司准教授には毎週個別に打ち合わせをして頂くなど、研究全体に渡り熱心にご指導して頂きました。心より感謝致します。

日頃の研究活動を支えてくださった古宇田フミ子助教授、千葉新吾技官に厚く御礼申し上げます。

秘書の元岡みさ子氏、中山早百合氏には事務面でのサポートに限らず日頃から温かい言葉をかけて下さいました。厚く御礼申し上げます。

研究室での生活を支えてくれた相田研究室の方々にも感謝致します。

そしてこれまで私を支えていただいた家族、友人、その他全ての方々にも深く感謝致します。皆様の助けがあって始めて、この論文を完成させる事が出来ました。本当にありがとうございました。

2015年2月5日

岡安 貴大

## 参考文献

---

- [1] D.Schmidt, J. Seifert, E. Rukzio, H. Gellersen, “A Cross-Device Interaction Style for Mobiles and Surfaces,” Proceedings of the Designing Interactive Systems Conference, pp. 318–327, 2012.
- [2] M. Goel, Md. T. I. Aumi, S. Patel, G. Borriello, S. Hibino, J. Begole, “ SurfaceLink: Using Inertial and Acoustic Sensing to Enable Multi-Device Interaction on a Surface, ” Proceedings of the 32nd annual ACM conference on Human factors in computing systems, pp. 1387–1396, 2014.
- [3] S. Greengerg, N. Marquardt, T. Ballendat, R. Diaz-Marino, M. Wang, “Proxemic interactions: the new ubicomp?,” interactions, vol. 18.1, pp. 42–50, 2011.
- [4] E. T. Hall, “The Hidden Dimension, ” Doubleday, New York, 1966.
- [5] M. Wang, S. Boring, S. Greenberg, “Proxemic peddler: a public advertising display that captures and preserves the attention of a passerby, ” Proceedings of the 2012 International Symposium on Pervasive Displays. ACM, pp.3, 2012.
- [6] W. Ju, B. A. Lee, S. R. Klemmer, “Range : Exploring Implicit Interaction through Electronic Whiteboard Design, ” Proceedings of the 2008 ACM conference on Computer supported cooperative work, pp. 17–26, 2008.
- [7] N. Marquardt, R. Diaz-Marino, S. Boring, S. Greenberg, “The Proximity Toolkit : Prototyping Proxemic Interaction in Ubiquitous Computing Ecologies, ” Proceedings of the 24th annual ACM symposium on User interface software and technology, pp. 315–326, 2011.
- [8] N. B. Priyantha, A. Chakraborty, H. Balakrishnan, “The Cricket Location-Support System, ” Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking, pp. 32–43, 2000.
- [9] M. Hirabayashi, M. Shimizu, “Cryptone: Interaction between Performers and Audiences With Inaudible DTMF Sounds, ” SIGGRAPH Asia 2012 Emerging Technologies, No. 5 , 2012.



- [10] D. Vogel, R. Balakrishnan, “Interactive Public Ambient Displays: Transitioning from Implicit to Explicit, Public to Personal, Interaction with Multiple Users, ” ACM Symposium on User Interface Software and Technology, Vol. 6, Issue 2, pp. 137–146, 2004.
- [11] T. Ballendat, N. Marquardt, S. Greenberg, “Proxemic Interaction : Designing for a Proximity and Orientation-Aware Environment, ” ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces, pp. 121–130, 2010.
- [12] F. F. Mueller, S. Stellmach, S. Greenberg, A. Dippon, “Proxemics Play : Understanding Proxemics for Designing Digital Play Experiences, ” Proceedings of the 2014 conference on Designing interactive systems, pp. 533–542, 2014.
- [13] G. Kortuem, C. Kray, H. Gellersen, “Sensing and Visualizing Spatial Relation of Mobile Devices, ” Proceedings of the 18th annual ACM symposium on User interface software and technology, pp. 93–102, 2005.
- [14] M. Budde, M. Köpke, M. Berning, T. Riedel, M. Beigl, “Using a 2DST Waveguide for Usable, Physically Constrained Out-of-Band Wi-Fi Authentication, ” Proceedings of the 2013 ACM international joint conference on Pervasive and ubiquitous computing, pp. 221–224, 2013.
- [15] K. Nakatsuma, H. Shinoda, “High accuracy position and orientation detection in two-dimensional communication network. ” Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 2297–2306, 2010.
- [16] I. F. Akyildiz, D. Pompili, T. Melodia, “Challenges for Efficient Communication in Underwater Acoustic Sensor Networks, ” ACM Sigbed Review, Vol. 1, pp. 3–8, 2004.
- [17] I. F. Akyildiz, D. Pompili, T. Melodia, “Under acoustic sensor networks: research challenges, ” Elsevier, Vol. 3, No. 3, pp. 257–279, 2005.
- [18] 越智 寛, 渡邊 佳孝, 志村 拓也, “QPSK 及び 8PSK を用いた深海域における音響通信実験, ” 電子情報通信学会技術研究報告, US2007-28, pp. 1–5, 2007.
- [19] 越智 寛, 渡邊 佳孝, 志村 拓也, 鎌倉 友男, “32 値直行位相振幅変調方式を用いた水中音響通信の実海域実験, ’ ’ 音響学会, Vol. 63, pp. 593–599, 2007.
- [20] R. Nandakumar, K. K. Chintalapudi, V. N. Padmanabhan, R. Venkatesan, “Dhwani: Secure Peer-to-Peer Acoustic NFC, ” Proceedings of the ACM SIGCOMM 2013 conference on SIGCOMM, pp. 63–74, 2013
- [21] 松岡 保静, “音響データ通信, ” 日本音響学会誌, 68 巻, 3 号, pp. 143–147, 2012.

## 参考文献

---

- [22] 松岡 保静, 中島 悠輔, 吉村 健, “可聴帯域における音波情報伝送技術 -音響 OFDM-, ” 電子情報通信学会, EA2006-24, pp. 25–29, 2006.
- [23] H. Matsuoka, Y. Nakashima, T. Yoshimura, “Acoustic OFDM System and Performance Analysis, ” IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Vol. E91-A, No. 7, pp. 1652–1658, 2008.
- [24] L. Boney, A. H. Tewfik, K. N. Hamdy, “Digital Watermarks for Audio Signals, ” IEEE Multimedia Computing and Systems, pp. 473–480, 1996.
- [25] ヤマハ株式会社, “音を使った新しい情報発信 INFOSOUND, ” <http://research.yamaha.com/network/infosound/>, 2015/01/22 閲覧
- [26] 株式会社ぐるなび, “おでかけ先でポイントが貯まるアプリ「ima ココデ」, ” [http://www.gnavi.co.jp/company/release/2013/130603\\_01.html](http://www.gnavi.co.jp/company/release/2013/130603_01.html), 2015/01/22 閲覧
- [27] NTT docomo, “シヨツぷらっと, ” <https://www.nttdocomo.co.jp/service/convenience/shoplat/>, 2015/01/22 閲覧
- [28] NTT docomo, “音波を使ったチェックインソリューション「Air Stamp」の提供開始, ” [https://www.nttdocomo.co.jp/info/news\\_release/2014/03/04\\_00.html](https://www.nttdocomo.co.jp/info/news_release/2014/03/04_00.html), 2015/01/22 閲覧
- [29] JR 東日本, “JR 東日本アプリ, ” <http://www.jreast-app.jp/>, 2015/01/22 閲覧
- [30] 株式会社 Will Smart, “音波通信アプリ「apno」, ” <http://willsmart.co.jp/service/apno/>, 2015/01/22 閲覧
- [31] M. Hazas, A. Hopper, “Broadband Ultrasonic Location System for Improved Indoor Positioning, ” Mobile Computing, IEEE Transactions, Vol. 5, No. 5, pp.536–547, 2006.
- [32] Interaction Technology Laboratory, “Ultrasonic-based Localization. ” <http://aiwww2.main.ist.hokudai.ac.jp/sonic/research/sonic.php>, 2015/01/24 閲覧
- [33] 斉藤 洋一, “デジタル無線通信の変復調, ” 電子情報通信学会, 1996.
- [34] Y. Akaiwa, “Introduction to Digital Mobile Communications, ” 電子情報通信学会, 1996.
- [35] 阪田 史郎, 嶋本 薫, “無線通信技術 大全, ” リックテレコム, 2007.
- [36] 西原 雅人, 梶川 嘉延, “音響 OFDM における音質を考慮した伝送特性の改善法 (無線通信のための信号処理及び一般), ” 電子情報通信学会, Vol. 110, No. 368, pp. 227–232, 2011.

## 参考文献

---

- [37] 林 大介, 柴山 秀雄, “音波を用いた MIMO 通信の実現に向けた検討,” 電子情報通信学会技術研究報告, EA2008-101, pp. 1-6, 2008.
- [38] 羽瀧 裕真, “M 系列を基に構成される系列とその通信への応用,” 電子情報通信学会 Fundamentals Review, Vol.3 No.1, pp. 32-42, 2009.

## 発表文献

---

岡安 貴大, 相田 仁, “適応フィルタを用いた音響通信における伝送エラー低減手法の検討,” 音響学会 2014年秋季研究発表会 論文集, pp. 53, 2014

宝珠山 治, 岡安 貴大 “超音波パラメトリックスピーカの歪を低減するボルトラフィルタにおける間引きの検討,” 2014年 電子情報通信学会ソサイエティ大会, A-4-21, 2014