Vol.2017-HCI-175 No.17
Vol.2017-UBI-56 No.17
2017/11/2

音波を用いたモバイル端末における通信接続範囲の制御

森山聡[†1]　高橋淳二[†2]　戸辺義人[†2]

概要：スマートフォンやタブレットといった，モバイル端末の急速な発達に伴い，プライベートな場だけでなく，ビジネスの場などにおいても利用されるようになってきた．たとえば，ミーティングなどの場で，同一空間にいる自分の意図した人にのみファイルを共有したい場合がある．現在は，クラウドサービスやメールなどを用いられることが多いが，これらはネットワーク環境が必須であり，使用できる場所が限られてします．そこで本研究では，P2P 方式である Wi-Fi Direct を用いることで環境に依存することなく，あらゆる環境でのファイル共有を狙う．しかし，従来の Wi-Fi Direct のセッションの確立には Bluetooth や Wi-Fi といった電磁波が用いられてきた．電磁波は数 m の範囲での距離の制御が困難であり，さらに壁などを透過してしまう．そこで本研究では，電磁波の代わりに音波を用いて P2P 通信を行うためのセッション確立を行うことで，近距離における接続範囲の制御を行う．クライアント端末からの音波の減衰率や，それを取得した際の方位角を用いることで，ホスト端末とクライアント端末の相対的な位置関係を認識し，それを用いてホスト端末が出力する最適な音波を求める．

キーワード：スマートフォン，P2P，音波，同一空間

Controlling of Communication Connection Range Using Acoustic Waves

SATOSHI MORIYAMA[†1]　JUNJI TAKAHASHI[†2]
YOSHITO TOBE[†2]

Abstract: Due to the rapid development of mobile devices such as smartphones or tablets, people use them not only in the private but also in the business. For example, in the meeting, people sometimes want to share files with the people who are in the same spot. Currently, Cloud services or mail are mainly used for sharing, but they have limited space to use because the Internet environment are necessary. Therefore, in this research, we use Wi-Fi Direct, which is one of P2P share, to share files anywhere without depending on the environment. However, electromagnetic waves such as Bluetooth or Wi-Fi are currently used to establish the session of Wi-Fi Direct. It is difficult for electromagnetic waves to control connection range within a few meters range, and they can go through walls. Accordingly, in our research, we establish sessions for P2P communications using acoustic waves instead of electromagnetic waves, and control the connection range at short range. By using attenuation rate of acoustic waves from client devices and the azimuth angle when acquiring it, the host device recognizes the relative position of client devices, and finds optimum acoustic waves to output signal.

Keywords: Smartphone, P2P, Acoustic Wave, Co-location

1. はじめに

近年，スマートフォンやタブレットなどといった，モバイル端末が急速に発達し普及している．それに伴い，利用用途もプライベートの場だけではなく，ビジネスの場においても多く用いられるようになってきた．写真やドキュメントファイルなど，様々なファイルの共有を行う機会は多く存在する．従来は，クラウドサービスなどのクライアント・サーバ方式や，端末間でファイルの共有を行う P2P (Peer-to-Peer)方式などが用いてファイルの共有を行われてきた．クライアント・サーバ方式を用いた場合には，ネットワーク環境が必須であり，使用できる環境が限られてしまうことが問題である．また，ファイルの容量が大きい場合には，アップロード，ダウンロード時間がかかってしまうことや，ネットワーク回線の速さにも依存してしまう．それに対して，P2P 方式を用いた場合には端末感で通信を行うため，ネットワーク環境に依存することなくファイルの送受信が可能となる．P2P 方式には，Wi-Fi Direct，IrDA，NFC などがあるが，本研究では数 m の範囲でのファイルの共有を行うことや，写真などの容量が大きいファイルを扱うことを想定しているため，Wi-Fi Direct を使用する．

従来，Wi-Fi Direct のセッションの確立を行う際には，Bluetooth や Wi-Fi などの電磁波を用いて周囲に存在するデバイスを認識し，ファイル共有を行いたい相手を選択することで，端末同士を接続していた．しかし，同一空間内に自分とファイル共有をしたい相手のみが存在する空間であれば共有は容易であるが，カフェやオフィスなどの不特定多数の人が存在する環境で，明示的に同一空間の広さを指

†1 青山学院大学大学院理工学研究科理工学専攻知能情報コース
Intelligence and Information, Graduate School of Science and Engineering, Aoyama Gakuin University

†2 青山学院大学理工学部情報テクノロジー学科
Department of Integrated Information Technology, College of Science and Technology, Aoyama Gakuin University

Vol.2017-HCI-175 No.17
Vol.2017-UBI-56 No.17
2017/11/2

定することは困難である．

本研究では，電磁波に比べて送信出力や周波数による伝搬距離や伝搬角度の制御が容易である，音波を用いることにより，情報伝達距離，角度を制御し，通信セッションの確立を試みる．また，クライアント端末から送信された音波の受信感度に応じて，ホスト端末は送信する信号の音波出力強度，周波数の調節を行い，信号の受信可能範囲の制御を行う．これにより，ホスト端末が意図した範囲に存在しているデバイスのみに，通信セッション確立のための信号を受信させることができる．我々は，周囲にいる者同士間で，音波で通信することを目的とするのでなく，通信自体には無線を利用し，Co-location にあるユーザのグループを生成するプロセスだけに音波を適用することを狙う．数メートルの近距離の範囲内において，電波よりも音波の方が距離に対する減衰が大きく，到達距離の制御が容易であることと,壁の透過に関しては音波の方が小さいことから，漏洩対策がしやすいことが音波を利用する理由である．

以降，2 章では関連研究と本研究の差異について述べ，3 章では，提案手法について述べる．4 章では，提案手法実現のための設計と実装について述べる．5 章では，本システムの評価実験とその考察を述べ，6 章 では，まとめと今後の展望について述べる．

2. 関連研究

本章では，本研究に関する既存の研究とそれらの問題点について述べる．

2.1 位置測位

通信セッションの確立を行う際に，ホスト端末の周囲に存在する端末の位置を認識し，クライアント端末の位置を把握する必要がある. 位置測位を行う技術として GPS が多く用いられているが，本システムの使用想定環境は屋内であるため，GPS の使用は不可能である．屋内位置測位の研究として，岩田らは少数のリーダを室内に配置し，超音波による位置測位を行うシステムの日常生活への適応の可能性について，検証を行った[1]．この研究では，室内に超音波センサを事前に設置する必要があるため，センサが取り付けられていない環境での位置測位は不可能である. また，設置コストがかかることや，センサの設置可能な場所に制約があるため，実用的ではない．鬼倉らは，無線 LAN の端末側測位と基地局側測位の両方を並行して行い，測位結果を組み合わせることで，高精度な屋内位置測位を可能とした[2]．この研究では，無線 LAN の電磁波を用いて位置測位を行っているため，壁やガラスなどを透過してしまい，誤検出が生じてしまう可能性がある. また，無線 LAN がある環境でかつ，基地局からの電波強度とそれに対応する位置を事前に調べておく必要があるため，限られた環境でのみ位置測位が実現する．

2.2 電磁波によるデータ通信

データの共有を行う際，従来は大きく分けて 3 つ方法が取られてきた．一つ目は，メールなどに添付する方法である．二つ目は，クラウドなどにアップロード，ダウンロードするクライアント・サーバ方式である．三つ目は，サーバなどを介すことなく通信を行う，P2P 方式である．先に挙げた 2 つの手法はインターネット環境が必要であり，またその環境によっては通信に長い時間を要する．それらに対し，P2P 方式はインターネットを介さずにデバイス間で通信を行うため，環境に依存することなく，データの共有を行うことができる. 石澤らは, Bluetooth を用いて Android 端末間で通信を行うためのアプリケーションの開発を行った[3]. Bluetooth の通信可能距離はおよそ 10 m であるため,同じ室内に存在する端末同士の通信が可能となる．また，水村らは，Wi-Fi Direct を用いて複数のデバイスとのファイル共有を行う際，スループットを考慮し，全端末へファイルが到達するまでの所要時間の最適化を行うシステムを作成した[4]． Wi-Fi Direct は Bluetooth よりも接続範囲が広いため, より広域な範囲での P2P 通信を可能とする. しかし，モバイル端末から発する電磁波の強度を制御することができないため, 10 m 以内のさらに近い範囲に存在する端末と通信を行いたい際にも，距離の制御を行うことは困難である．

2.3 音波によるデータ通信

ChirpCast[5]は，ネットワークアクセスキーを，超音波を用いて付近のデバイスに共有する研究である．超音波は指向性が強く，スピーカから直進方向におけるデータの送受信に適しているため，一対一の通信には適している．しかし，スピーカから角度のある範囲にあるデバイスに対してのデータの送受信が不可能であるため，一対多の通信には適していない．Kristian らは，超音波に近い高周波(約 20 kHz)の音を用いることにより，デバイス間でのファイルの共有を可能とした[6]．人間の可聴域がおよそ 20 Hz から 20 kHz であるが，人間の聴力は年齢と共に衰えるため，大人の可聴域の平均は 15 ~ 17 kHz である[7]．したがって，人間の可聴域外となる 20 kHz の音波を用いることにより，使用中にユーザに音を感知させることなく，ファイルの送受信が可能となった. しかし, 人間の可聴域外の高周波は，端末のマイクの性能により認識不可能であったり，スピーカの性能により出力不可能などの問題点がある．また，この研究では，デバイス間の距離が数 cm の範囲でのファイル共有を可能としているが，10 cm の距離から認識率が急激に下がってしまうという問題点もある．Dhwani[8]は，6 kHz から 16 kHz の音波によりデバイス間でデータの送受信を行う近距離通信(NFC)の研究である．この研究では，通

信可能距離が 10 cm 程度であり，セキュアな通信を可能とした．従来用いられている NFC の多くは，通信に電磁波が用いられているため, 対応している機器が限られているが，Dhwani はスピーカとマイクがあれば通信が可能となるため，一般的なモバイル端末での使用が可能となっている．しかし，通信可能範囲が狭いため，クライアント端末が数メートル離れた相手と通信を行うことが不可能である．

3. 提案手法

前章では，本研究に関連した既存研究とその問題点について述べた．それらの問題点を解決するために，本研究ではクライアント端末を指定する際に音波を用いることで，電磁波では困難であった近距離における接続範囲の制御を可能とした．音波は可聴域から超音波域までであるが，COTS (Commercial Off-The-Shelf) 機器であるスマートフォンに搭載されるスピーカとマイクロフォンの能力としての周波数特定に制限されることと，周波数に伴う指向性の変化，生成すべき Co-location の範囲を考慮すると，超音波帯に近い可聴域の音波を利用することとする．また，外部のセンサやサーバなど，使用する環境の設備などに依存せず，端末間で端末の位置関係を認識し，通信を行うことを可能とした．以下の項では，それらの問題点を克服するための手法について述べる．

3.1 周囲の端末の位置認識

端末間通信を行う際には，ホスト端末の周囲に存在する端末の中から接続する端末を選択し，ファイル共有を行う必要がある．前章で述べた通り，既存研究ではホスト端末の周囲に位置する端末を Bluetooth などの電磁波で認識し，複数の端末の中から，ホスト端末を所持するユーザが接続するクライアント端末を選択し，ファイル共有を行う必要があった．Bluetooth の伝搬距離は約 10 m であり，その範囲に存在する他の端末との距離を認識することは困難であった．そこで本研究では，電磁波と比較して距離減衰が大きい音波を用いることで，ホスト端末とクライアント端末の距離を取得する．一方の端末から一定の周波数，強度の音波を出力する．もう一方の端末がその音波を受信した際に，音波の受信強度を取得し，その取得した受信強度を元に，基準点からの減衰量 A を計算する．ホスト端末から基準点までの距離をあらかじめ $r_0 = 1$ m とし，基準点からクライアント端末までの距離を r とすることで，距離減衰を用いてホスト端末からクライアント端末までの距離を求めることができる．減衰量 A は(1)式で表される．

$$\mathrm{A} = 20 \times log_{10}(r/r_0) \qquad (1)$$

(1)式より，r を求める式が(2)式となる．

$$\mathrm{r} = r_0 \times 10^{A/20} \qquad (2)$$

(2)式より，基準点からクライアント端末までの距離を推測することが可能である．

3.2 信号に使用する音波の決定

従来の P2P 通信では，接続する際には Bluetooth や Wi-Fi などの電磁波が用いられていたが，電磁波は出力強度を制御することが困難であることや，壁などの障害物を透過してしまうため，ホスト端末から接続範囲を制御することは困難であった．音波を用いることで，接続可能距離を明示的に指定することができるため，同一空間外に存在するモバイル端末に接続を試みている状態を認識されることを防ぐことを可能とする．前項で取得した，ホスト端末からクライアント端末までの距離を用いて，信号を送信する際に用いる音波の出力強度を決定する．クライアント端末が音波信号を受け取るために必要な受信強度の閾値を B とする．ホスト端末から出力する音波の出力強度 V とすると，

$$V = B + A \qquad (3)$$

となるときに，クライアント端末までの範囲に存在する端末が信号を取得可能となる．前項の(1)式より，減衰量はホスト端末からクライアント端末までの距離で求めることができる．

$$V = B + 20 \times log_{10}(r/r_0) \qquad (4)$$

(4)式により，ホスト端末が出力すべき音波 V を得られる．

3.3 音波の周波数により接続角度の制御

音波は周波数により指向性が異なる．高周波はスピーカから直進方向への指向性が強く，低周波は指向性が弱い．この音波の性質を利用し，クライアント端末が存在する範囲に応じて，適切な周波数の音波を出力することで，スピーカからの角度を制御する．はじめに，ホスト端末は接続を行いたい範囲の角度を取得するために，両端に位置する端末の位置を取得する必要がある．両端に存在する端末は，それぞれ指向性の強い音波をホスト端末に向けて送信する．ホスト端末はそれらを受け取った際に方位角を取得し，それぞれの差から接続範囲の角度を求める．求まった角度を元に，ホスト端末は出力すべき音波の周波数を決定する．

4. 設計と実装

本章では，システムの設計と概要について述べる．本システムでは，ホスト端末モードとクライアント端末モードの 2 部で構成されており，アプリケーションを起動した際

に，ユーザがどちらか一方を選択することで端末間接続を行う．ホスト端末とクライアント端末は，図 1 のようにセッションを確立することで，P2P でのファイル共有を可能とする．

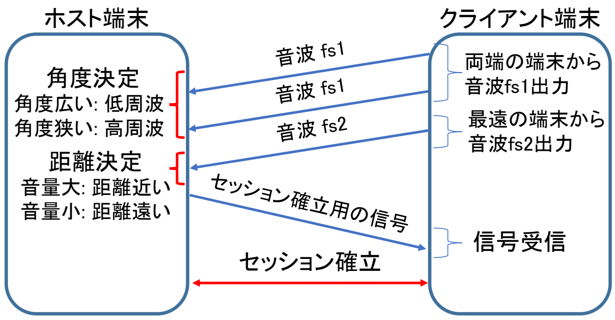

図 1　システム概要図

Figure 1　Outline figure of our system.

以降の項で，ホスト端末とクライアント端末での設計と実装について述べる．

4.1 ホスト端末

ホスト端末は, クライアント端末から得られる音波から，クライアント端末までの距離やセッションの確立を行いたい端末の位置関係を認識し，セッションの確立を行うための信号を送信する．ホスト端末の状態遷移は図 2 のとおりである．クライアント端末から得られる音波により，接続すべき範囲(角度, 距離)を取得する. その取得された接続すべき範囲に応じて，信号を送る際の適切な周波数，出力強度を決定する．その音波を用いて，クライアント端末へ接続に必要な情報を送り，クライアント端末から接続要求を得られたら，端末間接続が完了する．

端末間接続を行うための信号に使用する音波の決定は，図 3 のアルゴリズムで行う．このとき，セッションの確立を行いたい範囲の両端に位置するクライアント端末から送られる音波の周波数を fs1, 最も遠くに位置するクライアント端末からの音波 fs2 かつ発信源の音量 Vol_0 とする．また fs2 を受信した際の音量を Vol_1 とする．

図 3 のアルゴリズムで求められたホスト端末からの角度, 距離を元に，セッションを確立するための信号に用いる音波の周波数と出力強度を決定する．送る信号はセッション確立を行うために必要な情報を 2 進数化したものである．また，誤り訂正を行うためにパリティビットを含めた．音波を出力する際は， On-Off-Keying を用いている．

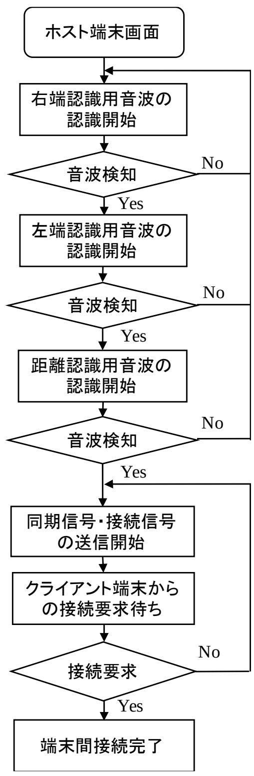

図 2　ホスト端末の状態遷移図

Figure 2　State Transition Diagram of Host Device.

$if\ fs1 >= threshold\ then$

$\quad obtain\ azimuth1$

$if\ fs1 >= threshold\ then$

$\quad obtain\ azimuth2$

$if\ fs2 >= threshold$

$\quad obtain\ volume\ of\ fs2$

$angle = azimuth1 - azimuth2$

$r = r_0 \times 10^{\{(Vol_0 - Vol_1)/20\}}$

図 3　信号の送信範囲を求めるアルゴリズム

Figure 3　Algorithm for Finding the Range of Signal Transmission

4.2 クライアント端末

クライアント端末は，ホスト端末との接続を行うための事前処理を行う必要がある．その際のクライアント端末の状態遷移図は図 4 のとおりである．

ホスト端末がセッションの確立を行う範囲を認識するために，セッションの確立を行いたい範囲の両端に位置するクライアント端末の位置関係を，ホスト端末に認識させる必要がある．また，ホスト端末から最も遠くに位置する端末との距離も認識させる必要がある．これらを解決するために，セッションの確立を行いたい範囲の両端に位置する端末と，最も遠くに位置する端末から，それぞれある特定

の指向性の強い周波数 fs, 特定の音量Aの音波を出力する．ホスト端末が取得した音波を元に，クライアント端末の位置や距離を認識し，セッションの確立に必要な信号を送信する．クライアント端末はその信号を受信し，セッションの確立を行う． セッションの確立された時点で，ホスト端末とのファイルの共有が行えるようにする．

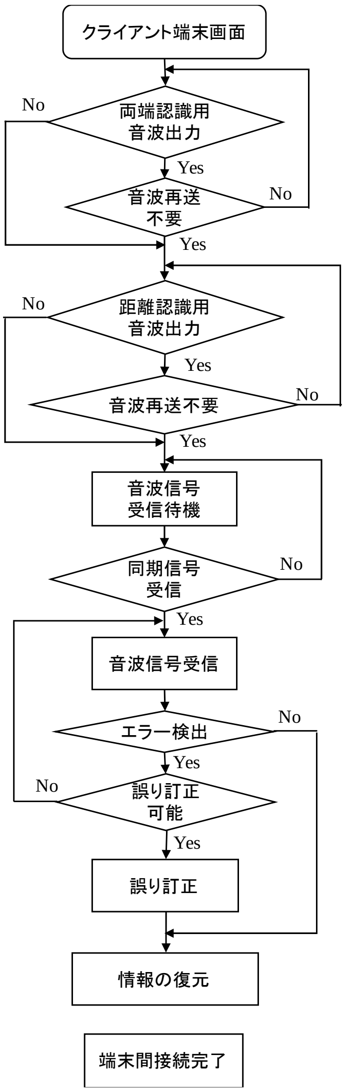

図 4 ホスト端末の状態遷移図

Figure 4 State Transition Diagram of Host Device.

5. 実験

本章では，本システムを使用する上での予備実験と，評価実験について述べる．本研究では 3 つの実験を行った．以降, 5.1 項では実験で使用したスマートフォンの周波数特性の測定結果を示す. 5.2 項では，距離マイクとスピーカの距離による減衰量の実測値を示す. 5.3 項では，スピーカからの距離，角度に応じて音の減衰を図に示す．なお，本実験で使用するモバイル端末は，LG の L-01J である．

5.1 スマートフォンのスピーカの周波数特性

アプリケーション内で音波を扱うため，予備実験としてスマートフォンのスピーカの周波数特性を測定した．実験環境は，図 5 で示したとおりである．測定結果を図 6 で示す．

スピーカ	LG L-01J
アンプ	内蔵
マイク	LG L-01J
スピーカ-マイク距離	1 cm

図 5 周波数特性測定の環境

Figure 5 The Experiment Environment of the Frequency Characteristics Measurement.

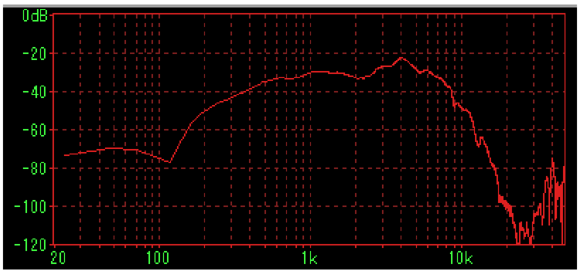

図 6 スピーカの周波数特性

Figure 6 Frequency of Characteristics of the speaker.

5.2 スマートフォン間の距離と受信感度

本実験では，一定の周波数，強度の音波をホスト端末から出力させた際，ホスト端末とクライアント端末の間の距離を変化させたときのクライアント端末の受信感度を測定し，端末間距離と受信感度の関係性を求めた．本実験で使用した音波は，周波数を 15 kHz とし，音波発信源の出力強度は -6.01 dB とした. 端末間距離と受信感度の測定結果を図 7 のとおりである.

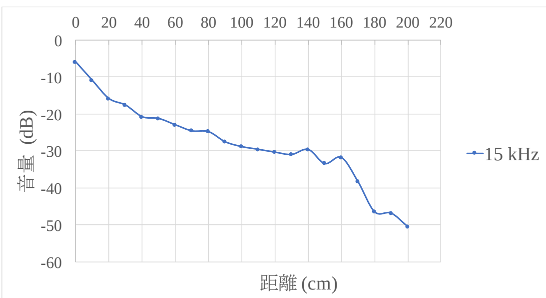

図 7 端末間距離と受信強度の測定

Figure 7 Measurements of RSSI Changing Distance

5.3 音波の広がりの測定

本実験では, 一定の周波数, 強度で音波を出力した際の，距離，角度を変更したそれぞれの地点での受信感度を測定した．音波の観測は，スピーカからの距離を 10 cm ずつ変化させ，さらにスピーカ面の直進方向から 10 度ずつ変化

Vol.2017-HCI-175 No.17
Vol.2017-UBI-56 No.17
2017/11/2

させた地点で行った．ホスト端末から 15 kHz，18 kHz の音波をそれぞれ発生させた際の，端末の周囲の受信強度の分布は図 8，図 9 のとおりである．測定時は，スマートフォンのスピーカを(0, 0)の地点に縦軸方向に向けて配置した．

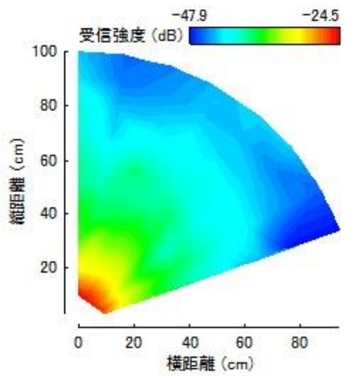

図 8　15 kHz の音波の受信感度
Figure 8　RSSI of 15 kHz Acoustic Waves

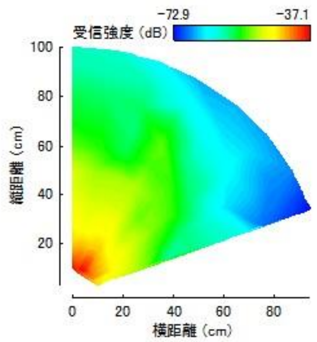

図 9　18 kHz の音波の受信感度
Figure 9　RSSI of 18 kHz Acoustic Waves

6. 考察

本章では，前章の実験結果の考察について述べる．スピーカの周波数特性により，10 kHz を超える高域な周波数の音波の送信強度は，使用する周波数帯により大きく変わることがわかる．この結果より，使用する端末により出力する音波の強度を一定にできるようにする必要があることがわかる．端末間距離と音波の受信強度の実験では，端末間距離が 10 cm 伸びるごとに，受信強度が大きく下がることがわかる．本システムでは，50 cm 毎の距離の制御を行うが，十分な受信強度の差が得られていることがわかる．

次にスピーカの周囲の受信感度の実験について述べる．図 8，図 9 から 15 kHz の音波を発進した際は音が空間に対して一様に広がっているのに対し，18 kHz の音波を発信した際には，横軸方向への音波の広がりは比較的小さいことがわかる．比較的周波数の小さい音波を用いた際には，指向性が弱く，比較的周波数の大きい音波を用いた際には，指向性が強いことがわかる．本実験で用いた LG の L0-1J の底部に位置するスピーカには音を発するための穴が 3 つ存在する．したがって，音の発信源は 3 つの点音源となる．一つの点音源の場合には，全方向に一様に音波が放射されるため無指向性となるが，点音源が複数存在する場合には，指向性が生じる．これは，各点音源から発生される音波が，スピーカから直進方向以外の方向において，位相差が変化し，合成音圧も変化してしまうためである．これら 3 つの実験結果より，音波の出力強度と周波数を変更することで，セッションの確立可能な範囲を制御することができることがわかる．

7. むすび

本研究では，音波を用いてモバイル端末での P2P 通信のセッション確立を行った．音波を用いることにより，特別な外部センサなどを用いることなく，モバイル端末に標準搭載されているマイクとスピーカで，端末間接続を可能とした．また，従来用いられてきた電磁波は距離減衰が小さかったが，音波は距離減衰が大きいため，電磁波では困難であった，近距離における接続範囲の制御を可能とした．さらに，端末間接続に必要な情報を送る際に音波の周波数を調節することで，接続範囲の角度も制御可能とした．

参考文献

[1] 岩田翔士，松島史朗，竹中司，「超音波センサを用いた屋内位置測位に関する基礎研究」，日本建築学会環境系論文集，Vol. 79，No. 702，p. 731-737，2014.
[2] 鬼倉隆志，高柳健司，望月祐洋，村尾和哉，西尾信彦，「無線 LAN の端末側測位と基地局側測位を用いた測位精度改善手法」，研究報告ユビキタスコンピューティングシステム（UBI），2015-UBI-46(3)，p. 1-8，2015.
[3] 石澤憲茂，武田敦志，「Bluetooth を使用した Android 端末間通信のためのアプリケーション開発」，情報処理学会東北支部研究報告，Vol.2012-4，2013.
[4] 水村直人，金岡諒，斉藤裕樹，高橋淳二，戸辺義人，「Wi-Fi Direct を用いた複数デバイス間ファイル共有転送最適化の検討」，マルチメディア，分散，協調とモバイル(DICOMO2016)シンポジウム，pp. 105 – 114，2016.
[5] Francis Iannacci and Yanping Huang, “ChirpCast: Data Transmission via Audio”, arXiv:1508.07099v1, 2015.
[6] Kristian Alvarez Jörgensen, Michael Chlebek, “Near ultrasonic close range communication for modern smartphones”, Degree Project in Technology, First Cycle, 15 Credits Stockholm, Sweden 2017, 2017.
[7] D. Purves, G. J. Augustine, D. Fitzpatrick, L. C. Katz, A.-S. LaMan- tia, J. O. McNamara, and S. M. Williams, Neuroscience, 2nd. Sinauer Associates, 2001, The Audible Spectrum. [Online]. Available: https: //www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK10924/.
[8] Rajalakshmi Nandakumar, Krishna Kant Chintalapudi, Venkata N. Padmanabhan, and Ramarathnam Venkatesan, “Dhwani: Secure Peer-to-Peer Acoustic NFC”, SIGCOMM’13, p.63-74, 2013.
[9] LG L-01J 仕様書 http://www.lg.com/jp/support/manuals?keyword=&superCateId=CT20160026&categoryId=CT20160027&subCateId=CT20160031&modelNum=L01J