

トランスポンダ方式を用いる屋内音響測位法に関する
研究

2020年 3月

岩谷 洋和

トランスポンダ方式を用いる屋内音響測位法に関する
研究

岩谷 洋和

システム情報工学研究科

筑波大学

2020年 3月

概要

測位とは、物体や人物の位置を特定する技術である。屋外においては、Global positioning system(GPS)を用いた測位が広く普及している。一方、屋内においても、GPSに代替する手段として、音波や電波、可視光や赤外光、加速度センサや地磁気センサ等の多様な手段を用いた測位方法が提案されている。しかし、既存の屋内測位手法において、測位の基準として用いるアンカの数、信号の変調方式、最適なセンサ配置、測位範囲と測位精度の関係等に一長一短があるため、屋内測位においては、決定的な手法が確立されていない。

そこで、本論文においては、低コストかつ広範囲を十分な精度で測位可能な屋内音響測位法の確立を目的とし、測位方法の基本設計と屋内音響測位において生じる問題の解決を行う。具体的には、水中において測位に用いられるトランスポンダに着目し、トランスポンダ方式の音響測位法を屋内に展開して測位を行う方法を検討した。

はじめに、トランスポンダ方式を用いる屋内音響測位法の基本的な性能を評価するため、無響室において測位実験を行った。実験の結果、信号の干渉の無い場合の端末ートランスポンダ間のTime-of-flight(TOF)計測では、十分な精度で測位が可能であったが、信号の干渉の有る場合においては、端末位置によっては全てのトランスポンダからの信号を精度良く検出できない場合があることを確認した。この原因は、端末ートランスポンダの位置関係によっては、受信信号と送信信号の相互相関関数のピークが正しく検出できないために生じた誤計測であると考えられた。そこで、トランスポンダにおいて、受信レベルに応じてレスポンス信号を制御する信号調整機能を導入し、改善した手法を用いて測位実験を行った。その結果、信号の干渉が有る場合、十分な精度で測位可能であることを示した。

次に、反射環境における屋内音響測位法の性能評価を行った。はじめに、反射環境においてトランスポンダ方式の音響測位法を展開し、測位実験を行った。その結果、反射環境では、TOF計測において、床等の反射の影響により多数のピークが発生することで、正確なTOF計測が困難になることを確認した。そこで、直達波が最初に到達するという仮定を行い、最初に到着するピークを直達波とみなす初期ピーク検出法を導入し、測位実験を行った。改良した計測法を用いた測位実験の結果、導入した初期ピーク検出法は有効に機能し、反射の影響の存在する実際の屋内環境においても、トランスポンダ方式の音響測位法は十分な精度で測位できることを確認した。

最後に、移動体測位に関する検討を行った。はじめに、従来手法を直接用いた場合の測距精度と測位における影響について調査した。その結果、トランスポンダ方式の屋内音響測位において、端末の移動速度に応じたランダムな測距誤差とオフセットの発生が確認され、高精度な測位のためには、測位方法の改善が必要であることを確認した。そこで、ドップラシフトの影響を加味した移動体測位の補正方法について検討

した．具体的には，受信信号とドップラシフトした参照信号の相互相関関数を計算することで，移動による相互相関関数のピーク低減を抑制し，精度良く TOF を計測する方法を提案した．次に，従来手法と補正を行った手法を用いて測距実験を行った．測距実験の結果，補正を行った場合において，移動速度が 1.2 m/s の時にピーク低減の抑制と精度良く測距できることを確認した．

以上の検討から，屋内音響測位における問題となる，時刻同期，反射対策，移動体対策をトランスポンダ方式の屋内音響測位法に適用することにより，屋内音響測位の実現可能性を示した．提案手法を大規模屋内空間や工場内等に適用することで，人物のナビゲーションや，作業ロボットの測位等への応用が期待できると考えられる．

目次

第1章	序論	1
1.1	研究の背景	1
1.2	本研究の目的及び論文構成	5
第2章	トランスポンダ方式を用いる音響測位法	7
2.1	はじめに	7
2.2	トランスポンダ方式の TOF 計測及び測位	7
2.3	信号レベルの調整	10
2.4	無響室における性能評価	11
2.4.1	応答信号の干渉が無い場合の性能評価	14
2.4.2	応答信号の干渉が有る場合の性能評価 (信号調整無)	14
2.4.3	応答信号の干渉が有る場合の性能評価 (信号調整有)	14
2.5	まとめ	20
第3章	反射環境における測位実験	21
3.1	はじめに	21
3.2	反射環境における性能評価	21
3.2.1	従来手法を用いた実験	22
3.2.2	考察	25
3.3	反射環境における TOF 計測方法の改良	27
3.4	初期ピーク検出方法を用いた測位実験	28
3.5	まとめ	32
第4章	移動体の測位実験	33
4.1	はじめに	33
4.2	従来手法を用いた移動体測位	33
4.3	移動体測位における対策	39
4.4	移動体測位における性能評価	39
4.5	まとめ	42

第5章	結論	43
5.1	研究成果の概要	43
5.2	残された課題	44
	謝辞	45
	参考文献	48
	著者論文	54

目次

1.1	本論文の概要 (Overview of this thesis).	6
2.1	トランスポンダ方式の音響測位法の概要 (Overview of transponder-based acoustical positioning methods) [45].	8
2.2	TOF の計測手順 (Procedure of measurement of TOF) [45].	9
2.3	SP の様々な周波数における角度特性 (Directivity of a loudspeaker at each frequency) [45].	12
2.4	SP と MIC の周波数特性 (Frequency characteristic of SP and MIC) [45].	12
2.5	実験系の概要 (Overview of experimental environment) [45].	13
2.6	実験手順の概要. (a) Case #1: 干渉の無い場合の測位実験. (b) Case #2: 干渉が有る場合の測位実験 (信号調整無). (c) Case #3: 干渉が有る場合の測位実験 (信号調整有) [Schematic views of experimental procedure. (a) Case #1: Positioning without response signal interference. (b) Case #2: Positioning with response signal interference (without adaptive signal level normalizer). (c) Case #3: Positioning with response signal interference (with adaptive signal level normalizer) [45].	16
2.7	実験から得られた (i) 理想的なレスポンス信号, (ii) 受信したレスポンス信号, (iii) (i) と (ii) から得られた相互相関関数の一例 . (a) Case #1: 干渉の無い場合の測位実験. (b) Case #2: 干渉が有る場合の測位実験 (信号調整無). (c) Case #3: 干渉が有る場合の測位実験 (信号調整有) [Examples of (i) ideal response signal, (ii) received response signal, and (iii) cross-correlation function between (i) and (ii) obtained from experiments. (a) Case #1: Positioning without response signal interference. (b) Case #2: Positioning with response signal interference (without adaptive signal level normalizer). (c) Case #3: Positioning with response signal interference (with adaptive signal level normalizer)] [45].	17

2.8	実験から得られた測位結果. (a) Case #1: 干渉のない場合の測位実験. (b) Case #2: 干渉がある場合の測位実験 (信号調整無). (c) Case #3: 干渉がある場合の測位実験 (信号調整有) [Positioning results obtained from experiments. (a) Case #1: Positioning without response signal interference. (b) Case #2: Positioning with response signal interference (without adaptive signal level normalizer). (c) Case #3: Positioning with response signal interference (with adaptive signal level normalizer)] [45].	18
2.9	端末とトランスポンダ間の実際の距離と推定した距離の関係. (a) Case #1: 干渉の無い場合の測位実験. (b) Case #2: 干渉が有る場合の測位実験 (信号調整無). (c) Case #3: 干渉が有る場合の測位実験 (信号調整有) [Relationship between actual and estimated ranges between terminal and transponders. (a) Case #1: Positioning without response signal interference. (b) Case #2: Positioning with response signal interference (without adaptive signal level normalizer). (c) Case #3: Positioning with response signal interference (with adaptive signal level normalizer)]. [45]	19
3.1	実験系の概要: (a) 測距実験, (b) 測位実験 (Schematic view of experiment system: (a) ranging experiment and (b) positioning experiment) [51].	22
3.2	MIC と SP の指向特性及び周波数特性 (Directivity and frequency characteristics of MIC and SP) [51].	23
3.3	端末とトランスポンダ間のインパルス応答の例 (細線: 直達波が反射波を越えた例; 太線: 反射波が直達波を越えた例) [Impulse responses between the terminal and the transponder (thin: direct signal exceeds the reflected signal; thick: reflected signal exceeds the direct signal)] [51].	24
3.4	最大ピーク検出を用いた測距結果 (Ranging result obtained using maximal peak detection) [51].	25
3.5	最大ピーク検出を用いた測位結果 (Positioning result obtained using maximal peak detection) [51].	26
3.6	相互相関関数の一例: (a) 無響室及び (b) 実験室 (Example of cross-correlation function: (a) anechoic chamber and (b) room) [51].	27
3.7	初期ピーク検出を用いた測距実験の結果 (Ranging result obtained using first peak detection) [51].	29
3.8	初期ピーク検出を用いた測位実験の結果 (Positioning result obtained using first peak detection) [51].	30

3.9	端末の位置推定の誤差と端末トランスポンダの中心からの距離 d_c との関係 (Average positioning error of estimated terminal position versus distance d_c between the terminal and the center of transponders in positioning experiment) [51].	31
4.1	シミュレーションにおける端末の移動速度と PAPR の関係 (Simulations of velocity of moving terminal versus PAPR) [52].	34
4.2	実験系の概要 (Schematic view of experiment set up).	35
4.3	信号処理の一例; (i) 送信信号, (ii) 受信信号, (iii) (i) と (ii) の相互相関関数, (a) $v = 0:12$ m/s, (b) $v = 0:24$ m/s, and (c) $v = 0:96$ m/s [Examples of signal processing; (i) transmitted response signal, (ii) received response signal, (iii) cross-correlation between (ii) and (i), (a) $v = 0:12$ m/s, (b) $v = 0:24$ m/s, and (c) $v = 0:96$ m/s] [52].	36
4.4	端末の移動速度と PAPR の関係 (Relationships between velocity of moving terminal and PAPR) [52].	37
4.5	端末の移動速度に応じた測距結果と真の距離との関係; (a) $v = 0:12$ m/s, (b) $v = 0:24$ m/s, (c) $v = 0:36$ m/s (Relationships between measured distance and true distance in various velocity of terminal movement; (a) $v = 0:12$ m/s, (b) $v = 0:24$ m/s, (c) $v = 0:36$ m/s) [52].	38
4.6	実験系の概要 (Experimental setup) [53].	40
4.7	PAPR (a) ドップラ補正無 ,(b) ドップラ補正有. [PAPR (a) without Doppler shift correction and (b) with Doppler shift correction] [53].	41
4.8	TOF から得られた端末位置の誤差 (a) ドップラ補正無 ,(b) ドップラ補正有 [Error of terminal position obtained from TOFs (a) without Doppler shift correction and (b) with Doppler shift correction] [53].	41

第1章 序論

1.1 研究の背景

測位とは物体や人物の位置を特定する技術である [1]。現在においては，Global positioning system (GPS) による測位が広く利用されている。GPS は，衛星からの電波を地上の端末で受信することにより，衛星と端末間の距離を計測し，端末の位置を推定するものであり，カーナビゲーションをはじめとし，様々な用途への利用が広がっている。

今日の日本においても，官民の分野を隔てない測位の利用が進行する中，国土交通省が主体となり，高精度測位社会に関するプロジェクトが 2014 年に発足し，屋内外をシームレスに測位するための検討が行われる等，屋内外を問わない測位環境の確立が強く求められている [2]。

屋内外のシームレスな測位が強く求められている一方，ショッピングモール，ビルや地下鉄構内等の大規模屋内空間においては，電波の減衰等の理由により，GPS の信号を直接測位のために利用できないことが問題となっている。そこで，GPS の代替手法として屋内測位を実現するために，電波，赤外光，可視光，地磁気，加速度，音波等を用いる多様な方法が検討されている (Table 1.1)。

電波を用いる測位方法は，Indoor messaging system (IMES) や Bluetooth low energy (BLE)，Ultra wide band (UWB) 等が提案されている [3–5]。IMES は，GPS と同様の周波数帯の信号を送信する送信機と GPS 受信機を用いて測位を行う。Kohtake らは，IMES の送信機と Wi-fi を用いて IMES による測位を補正する方法を提案し，10 m 程度の精度で測位が可能であると報告している [3]。UWB は，500 MHz から数 GHz にわたる広帯域の周波数を用いて信号を送信して，専用の端末で信号を受信して測位を行う。水垣は，UWB の通信方式による基準局の時刻同期と数 ns 程度のインパルス状の信号を用いる測位方法を提案し，23.3 m × 9.4 m の範囲の作業エリアにおいて，誤差 0.3 m 程度の高精度な測位が可能であると報告している [4]。BLE は，電波の信号強度から位置推定を行う手法であり，消費電力が低く，長時間利用に適した測位方法である。古舘らは，歩行者ナビゲーションへの応用を視野に，BLE ビーコンの Received-signal-strength-indicator(RSSI) と加速度センサを用いてあらかじめ計測して

Table 1.1: 屋内測位の概要 (Summary of indoor positioning) [3–14].

計測方法	GPS, IMES	BLE	UWB	IR	カメラ	PDR	超音波	可聴音
信号	電波	電波	電波	赤外光	可視光	加速度 角速度 磁気, 気圧	超音波	可聴音
計測原理	三辺測量	RSSI	三辺測量	三角測量	三角測量	積分計算	三辺測量	三辺測量
誤差オーダー	~ 10 m	~ 1 m	~ 0.3 m	~ 0.7 m	~ 0.1 m	時間増加	~ 0.17 m	~ 0.3 m
誤差要因	反射	反射	反射	遮蔽	遮蔽	累積誤差	反射	反射
設置コスト	小	小	大	小	中	小	小	小
計算コスト	中	中	中	小	大	大	小	小
測位範囲	大	中	大	中	中	大	小	中

いたRSSIと受信したRSSI間の変位から測位する方法を提案している。5個のビーコンを配置し、40 m 直進した後に右折し 20 m 直進するという実験において、3 m 以内の測位精度を実現したと報告している [5]

以上のような電波を用いた測位方法について、IMES やUWB においては、信号を送信するデバイス自体が専用デバイスとなるため、センサの設置コストが増加してしまう。BLE においては、市販品の利用が可能であるため、センサ自体の設置コストは低いが、測位精度は数 m 程度であり、1 m 以内のより高精度な測位は難しいのが現状である。

赤外光やカメラを用いた測位方法では、赤外光の受信強度や画像データの特徴点から三角測量により測位を実現する。電波を用いる手法と比較して、誤差 1 m 以内の高精度な測位が期待できると報告されている [6–8]。森永らは、工場における在庫管理への応用を視野に、カート底面に赤外線送信機を取付け、床面の受光素子で受信した信号強度を用いた測位方法を提案しており、数十個程度の受光素子を床面に配置することで、0.5 m 程度の測位精度を実現している [6]。Sakai らは、小売店での測位への応用を視野に、買い物かごに赤外線送信機を取付け、天井に設置した受光素子で、赤外線の送信角度を算出し、三角測量の原理を用いた測位方法を提案している [7]。実験において、7 m × 2 m の範囲で、0.7 m 程度の高精度な測位精度を実現している。中澤らは、LED 照明に振幅変調を施したランドマークを魚眼レンズを用いたカメラで計測し、測位を行う方法を提案している [8]。8 m × 6 m × 3 m の範囲において、6 個のランドマークを用いて 0.1 m 程度の高精度な測位を実現している。

一方で、赤外光を屋内測位に用いる場合、障害物により信号が遮蔽される等、信号の送信範囲や信号強度によっては、多数のセンサが必要となる可能性がある。

Table 1.2: 音響測位の要約 (Summary of acoustical positioning) [11–14].

Name	Synchronization	Number of anchors	Positioning Area	Frequency (kHz)	Positioning Accuracy
Active Badge	Necessary	16	75 m ³	40	~0.14 m
Cricket Compass		4	2.5 m ³		~0.25 m
Dolphin		24	13 m ²		~0.17 m
Phase Accordance		2	3 m		~0.3 mm
Transponder-based (Proposed)	Unecessary	3	147 m³	5	~0.1 m

また、カメラを屋内測位に用いる場合、取得された画像データをそのまま測位に用いるため、広い範囲を測位する際、データ量が増大するとともに、プライバシー保護の観点にも留意する必要がある。

Pedestrian Dead Recognizing (PDR) による加速度センサや地磁気センサを用いた自立航法による測位は、GPS による測位を補完できることから注目されている [9, 10]。興枙らは、博物館へのナビゲーションへの応用を視野に、加速度センサと地磁気センサ、GPS、マップマッチング、RFID の測位方法を統合した測位システムを提案している。延べ床面積 2500 m² において、平均誤差 3.7 m を達成したと報告している [9]。

森らは、GPS による測位の補完方法として、GPS と地磁気を併用した測位を提案している [10]。これは、GPS の連続的な測位が不要な状況において、地磁気センサで計測した磁気の変化量を用いて人物の移動量を推定することで、消費電力の削減と測位精度向上を図っている。

しかし、上記のような加速度センサを測位に用いる場合、移動距離に応じて蓄積誤差が増大するため、蓄積誤差の補正や、その他の測位手法の併用が不可欠である。また、地磁気センサを用いる場合、測位範囲における鉄骨や磁気を帯びた機材の影響で地磁気に変化してしまい、測位精度が大きく変化してしまうため、事前の環境調査が必要不可欠であり、測位のための課題は多く残っている。

一方で、音波を用いた測位方法についても広く検討がなされている [11–14]。音波は、電波と比較して、伝搬時間が 10⁶ 程度遅いという特徴があり、マルチパスの除去を簡易に行うことができるため、高精度な測位が期待できる。加えて、市販のマイクロフォンやスピーカといった部品は、一般的に安価であることから、送受信機のコストを低く抑えることが可能であるため、低コストな測位が期待できる。

ここで、音響測位における同期の有無、測位の基準となるアンカの数、測位範囲、使用周波数、測位精度の要約について、Table 1.2 に示す。

Ward らは、Active Badge という超音波送信タグと天井に配置した複数の受信機を

用いて測位する手法を提案している [11]。超音波の送信タイミングと無線信号を同期しているため、天井の受信機では、複数の TOF を計測可能であり、 75 m^3 の範囲において、16 個の受信機を用いて、0.14 m 程度の測位精度を実現している。

Priyantha らは、Cricket Compass と呼ばれる測位方法を提案している [12]。この手法では、天井に複数の無線で同期した超音波送信機から 2 つのマイクロフォンを搭載した受信機に信号を送信し、受信機において信号の角度を計測することで位置を推定する。実験において、 2.5 m^3 の範囲において、4 個の送信機を用いて、0.25 m 程度の測位精度を実現している。

南らは、自律分散型の測位システムへの応用を視野に Dolphin という超音波測位システムを提案している。無線により同期された超音波信号をノード毎に逐次繰り返すことで、一つ一つのノードの位置情報を計測して、見通し外に配置されているノードの測位を行うことができるのが特徴である [13]。実験において、 13 m^2 の範囲において、24 個の送信機を用いて、0.17 m 程度の測位精度を実現している。

橋爪らは、位相一致法という測位方法を提案している [14]。これは、2 つの正弦波を重ねた超音波信号の送受信を行い、複数の受信機で受信された信号の位相情報から伝搬距離と角度を計測して測位を行うものである。実験において、3 m の範囲において、2 個の送信機を用いて、0.3 mm 程度の非常に高精度な測位精度を実現している。

Hirata らにおいては、M 系列符号を変調した超音波を用いた位置姿勢速度計測を提案しており、超音波を用いて、高精度な測位が可能であると報告している [29–32, 34, 36, 38, 39]。

Widodo らにおいては、M 系列符号を変調した超音波を用いて圃場におけるロボットの測位について提案しており、移動体測位においても、数十 mm 程度の誤差オーダーで測位できることを報告している [37]。

以上で述べたような超音波を用いた測位においては、一般的に超音波の送受信機間における Time-of-flight (TOF) を計測することで測位が実現できる。これまでに、超音波を用いて TOF を計測する技術は、産業用資材等の非破壊検査 [15–20]、圃場における温熱環境計測 [21–25]、各種計測への応用等 [41–43]、測位に限らずとも、幅広い提案がなされている。

しかし、既存の超音波を用いた測位方法には、2 つの問題点が存在する。

一点目は、音波を用いて TOF を計測するためには、無線等により送受信機間の正確な時刻同期を行う、もしくは、多数のセンサアレイを用いて信号処理を行う Time-differential-of-arrival (TDOA) 方式を採用しなければならないことである。そのため、送受信機間において、無線や有線による時刻同期機構の確立や、多数のセンサを使用するためのコストが生じてしまい、測位システム自体が複雑化してしまう可能性がある。

二点目は、既存の超音波を用いた測位において、空気中における距離減衰が大きく、送信機自体が強い指向性を有するため、測位範囲が数 m 程度の局所的な範囲に限定されてしまうことである。そのため、超音波を用いて広範囲を測位するためには、測位が必要な範囲に多数のセンサを設置することになり、結果的にセンサの設置コストが増大するという問題点が存在する。

1.2 本研究の目的及び論文構成

屋内空間において、送受信機間の複雑な時刻同期を不要として、低コストかつ広範囲を測位可能な音響測位法について確立することができれば、大規模な屋内空間における人々の詳細なナビゲーションや、工場内における作業ロボットや、インフラ点検用ドローンの測位等への応用が期待できる。

本研究においては、低コストかつ広範囲を十分な精度で測位可能な屋内音響測位法の確立を目的とする。具体的には、デバイス間の時刻同期が不要なトランスポンダ方式を用いる屋内音響測位法について注目し、トランスポンダ方式の音響測位システムを設計する。さらに、屋内測位において、詳細なナビゲーションに必要である 0.1 m 程度の測位精度を実現可能であるかの検討を行う。加えて、実際の屋内環境において少数のトランスポンダを展開し、提案手法が広い範囲を測位可能であるかの検討を行う。さらに、移動体測位におけるドップラシフトの測位精度への影響についても検討を行い、屋内において生じうる時刻同期、反射、移動体測位等の対策を行い屋内音響測位法の確立を目指す。

本論文の構成について、Fig. 1.1 に示す。第 2 章においては、非時刻同期のトランスポンダ方式による音響測位法について説明し、無響室において信号調整機能を実装した測位実験の結果について述べる。第 3 章においては、屋内における反射の問題を説明し、反射対策を実装した測位実験の結果について述べる。第 4 章においては、移動体測位における問題点について説明し、移動対策を行った測位実験の結果を説明する。第 5 章においては、本研究のまとめについて述べる。

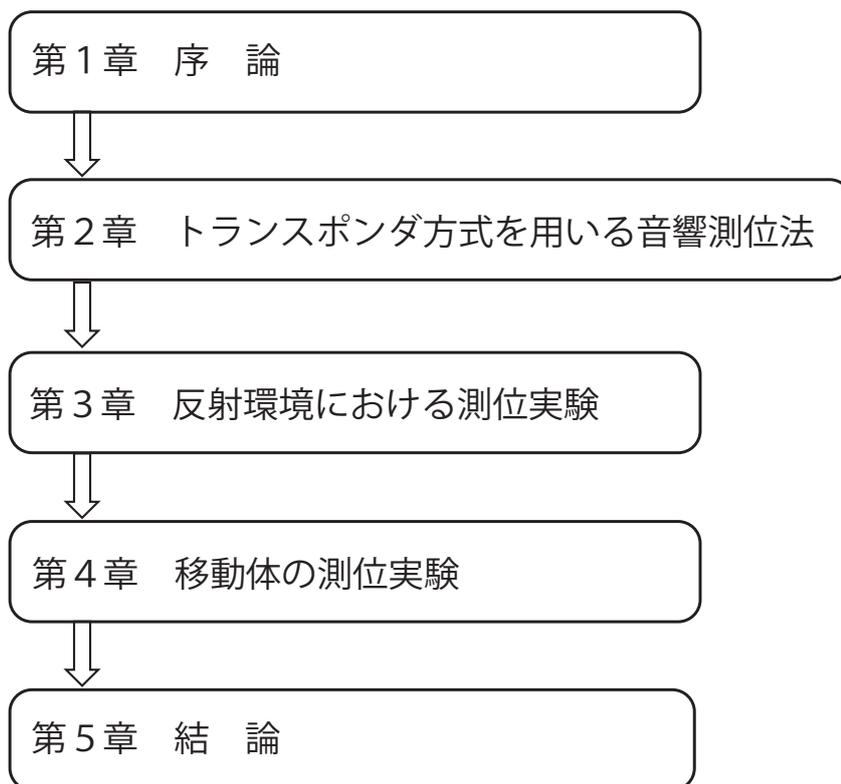


Fig 1.1: 本論文の概要 (Overview of this thesis).

第2章 トランスポンダ方式を用いる音響測位法

2.1 はじめに

本章においては，トランスポンダ方式を用いる音響測位法の概要について述べる [44, 45]．まず，測位の為に不可欠である TOF 計測の既存手法とトランスポンダ方式の TOF 計測手法について述べ，測位方法を説明する．加えて，音波の干渉が存在する場合にも有効であるトランスポンダにおける信号調整機能について説明する．さらに，無響室における測位実験を行った結果について示し，提案手法の有効性について述べる．

2.2 トランスポンダ方式の TOF 計測及び測位

通常，音響測位は，マイクロフォンとスピーカ間における音響信号の TOF を計測し，音速と TOF の積からアンカと端末間の距離を推定する．ここで，一般的な TOF 計測の方法について示す．

1. アンカ/端末は，優れた自己相関特性を有する音響信号 (例えば，チャープ信号や M 系列) を特定の時間に送信する．
2. 端末/アンカは，受信信号と送信信号の相互相関関数を計算することで，ピークの最大位置を検出することにより，TOF を求める．

正確に TOF 計測を行うためには，アンカと端末間において正確な時刻同期が行われていることが前提条件である．仮に，端末が複数の TOF の情報とアンカの位置情報を有していれば，三辺測量の要領で端末の位置を推定することができる．

廊下や小部屋等の小規模な範囲においては，上記のような TOF 計測を超音波を用いることで，0.1 mm - 0.3 m 程度の高精度な測位が実現可能である [12, 13, 26–31, 34, 36, 38, 39, 46–48]．

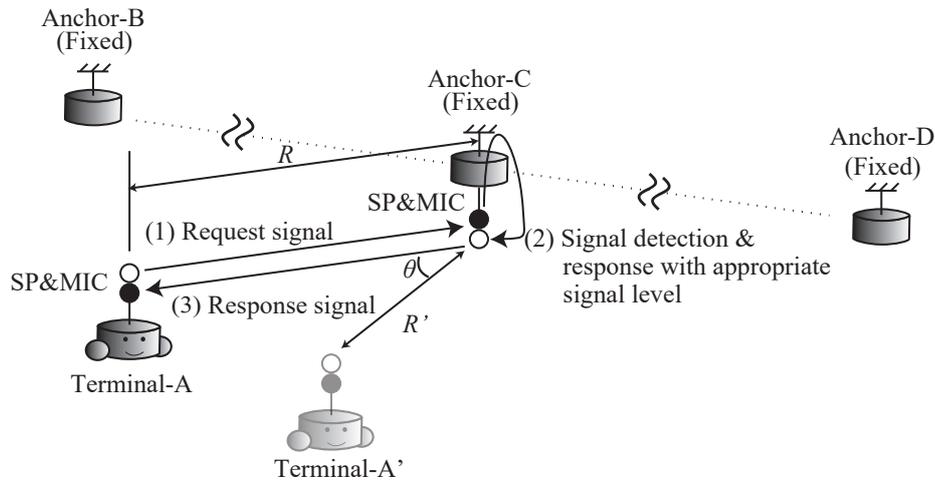


Fig 2.1: トランスポンダ方式の音響測位法の概要 (Overview of transponder-based acoustical positioning methods) [45].

しかし、超音波を用いる測位方法では、アンカと端末間において、正確な時刻同期を行った上でTOFを計測する必要がある。そのため、無線や赤外光等を用いて送受信機間の時刻同期を行う必要があり、大規模空間においては、測位システムの構成が複雑になるという問題点がある。また、超音波を用いる測位手法を大規模空間へ適用する場合、超音波の指向性や減衰等により、測位範囲が制限されてしまい、結果的に多数のセンサが必要になり、測位のためのコストが増大してしまう問題点がある。

このような時刻同期と超音波の減衰による問題に対応するため、トランスポンダ方式及び可聴音を用いる測位方法を提案する。提案する計測手法は、トランスポンダを用いることで時刻同期不要な測位を実現するとともに、超音波と比較して広い伝搬特性を有する可聴音を用いることにより、センサの設置コストの問題を解決する。加えて、複数の可聴音の干渉による測位精度の悪化を防ぐため、信号レベル調整機能を提案する。

ここで、トランスポンダ方式の音響測位法の概要についてFig. 2.1に示す。提案手法は、以下の手順で測位を実現する。

1. 端末は、音響信号(リクエスト信号)を既知の位置に配置されたトランスポンダに対して送信する。
2. トランスポンダは、リクエスト信号を検出後、一定の遅延時間後に音響信号(レスポンス信号)を送信する。
3. 端末は、レスポンス信号を受信し、端末と複数のトランスポンダ間のTOFを検出し、複数の距離情報とアンカの位置情報を用いて端末の位置を推定する。

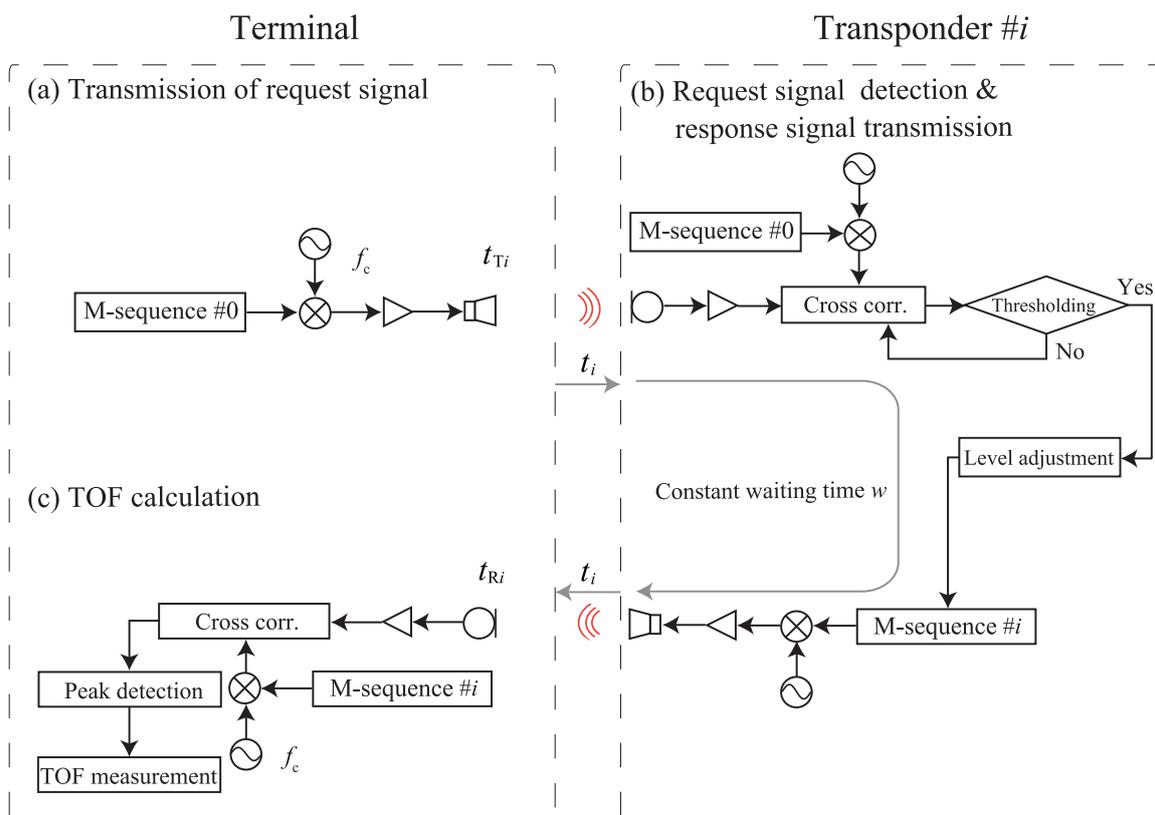


Fig 2.2: TOF の計測手順 (Procedure of measurement of TOF) [45].

提案手法の特徴は，以下 2 点である．まず，可聴音を音響信号として用いるため，超音波と比較して空気中の減衰を少なくすることで，広い範囲を測位でき，センサの設置コストを低減できる．さらに，端末とアンカ間において，トランスポンダ方式による往復 TOF 計測により，送受信機間の時刻同期が不要であるため，トランスポンダを屋内の天井等に設置することで簡便な測位が可能となる．

次に，TOF 計測の手順について，Fig. 2.2 に示す．はじめに，端末は，天井等に設置された位置座標が既知のトランスポンダ # i ($i = 1, 2, 3$) に対し，時刻 t_{Ti} にリクエスト信号を送信する．リクエスト信号には，M 系列符号を用いる．M 系列符号は，シフトレジスタを用いて作成することができる疑似乱数系列の一つであり，同じ符号同士の相互相関関数を計算する際に，優れた自己相関特性を有する．そのため，相互相関関数の計算により，顕著なピーク位置を求めることで，精度よく TOF を求めることが可能である [29, 31, 34, 46]．次に，空气中を伝搬したリクエスト信号を各トランスポンダで受信する．各トランスポンダは，リクエスト信号と同様の M 系列と固有の

M 系列 # i を保有しており，これらの相互相関関数のピークを閾値により検出することで，リクエスト信号の検出を判断する．また，相互相関関数のピーク値の大きさから，レスポンス信号の送信レベルを調整する．そして，一定の遅延時間 w 後に，端末に対し，レスポンス信号を送信する．最終的に，端末において，時刻 t_{Ri} にレスポンス信号を受信する．トランスポンダ側の処理と同様に，相互相関関数の計算により，以下の式を用いることで，往復 TOF t_i を計測する．

$$t_i = \frac{t_{Ri} - t_{Ti} - w}{2}. \quad (2.1)$$

さらに，音速 c 、トランスポンダの座標 $\mathbf{x}_i = (x_i, y_i, z_i)^T$, ($i = 1, 2, 3$) 及び端末と複数のトランスポンダ間の距離 r_i を用いて，端末の位置 $\mathbf{x} = (x, y, z)^T$ は，

$$\begin{aligned} r_i &= ct_i, \\ r_i^2 &= (x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2, (i = 1, 2, 3). \end{aligned} \quad (2.2)$$

と求められる．ここで，Eq. (2.2) は，非線形連立方程式となる．計算機上で端末の位置を求めるため，GPS の測位方法を参考として，最適化計算手法の一つである，Newton-Raphson 法を用いて，繰り返し計算の結果，端末の位置を推定する [1]．

2.3 信号レベルの調整

上述した測位方法において，測位精度は，TOF の計測精度に依存する．ここで，複数のトランスポンダから送信されたレスポンスを同時に受信することを考えると，複数のレスポンスを含む受信信号と各レスポンス信号の相互相関関数を計算する際に，他のレスポンス信号が干渉し，正しい TOF の計測が困難になる恐れがある．そこで，同時計測における干渉が存在する場合に対応するため，トランスポンダにおける信号レベル調整機能の導入することで，端末において複数の受信信号の大きさを正規化する．

信号レベルの調整を行うために，端末とトランスポンダ間を伝搬する信号の減衰の大きさは，往路と復路でほぼ等しい性質を仮定する．具体的には，トランスポンダは，リクエスト信号の減衰から間接的にレスポンス信号の減衰を推定し，端末におけるレスポンス信号の受信レベルが適切になるよう調整する．ここで，トランスポンダと端末のスピーカ (SP) と マイクロフォン (MIC) は，同一で，かつ，SP と MIC は，それぞれの装置内で十分近接した場所に搭載してあるものと仮定する．以降，単一の端末とトランスポンダ間における信号のやり取りを例に説明する．

はじめに，トランスポンダは，リクエスト信号を受信して (i) 受信信号とリクエスト信号との相互相関関数を計算する．次に，トランスポンダは，レベル調整を行った

レスポンス信号を送信する．端末は，レスポンス信号を受信し，(ii) 受信信号とレスポンス信号の相互相関関数を計算する．ここで，往路と復路において，信号の減衰量は等しいという仮定から，相互相関関数のピーク値は，(i) と (ii) において同様の値である．言い換えると，トランスポンダは，(ii) のピーク値を (i) の値から推定し，信号レベル調整を行うことができる．(i) のピーク値を C_{\max} ，理想的な (ii) の受信レベルを C_i ，トランスポンダにおけるレスポンス信号の送信レベルを SL_r とすると，

$$SL_r = \frac{SL_t C_i}{C_{\max}}, \quad (2.3)$$

と表現できる．ここで， SL_t は，端末におけるレスポンス信号の受信レベルである．

ここで，上記の仮定が正しいとすると，(ii) におけるピークの値は， C_i と一致する．以上の手順において，仮定した条件を満たすために，以降の測位実験において，スピーカ (SP) とマイクロフォン (MIC) は同一のものを端末とアンカで利用し，SP と MIC の位置はできる限り近づけて配置した．

2.4 無響室における性能評価

前節において説明した，提案手法の有効性を確認するため，無響室において測位実験を行った．端末及びトランスポンダは，SP (F00805H2)，MIC (DB Products, c9767)，A-D/D-A コンバータ (USB-6212 and 6221, National Instruments)，コンピュータ (PC) を有線接続して構成した．送信信号の計算や受信信号の計測制御は，PC 内のソフトウェア (LabVIEW, National Instruments 及び MATLAB) で行った．

はじめに，SP と MIC の角度特性を計測した．SP と MIC 間隔を 1 m の位置に対向させた角度を 0 度とし，5 度ずつ 90 度の範囲で SP の角度を変化させ，1 kHz, 3 kHz, 5kHz, 7kHz, 9 kHz, 10 kHz の周波数の正弦波を 1 秒送受信を 10 回ずつ計測した．SP の様々な周波数における角度特性を Fig. 2.3 に示す．

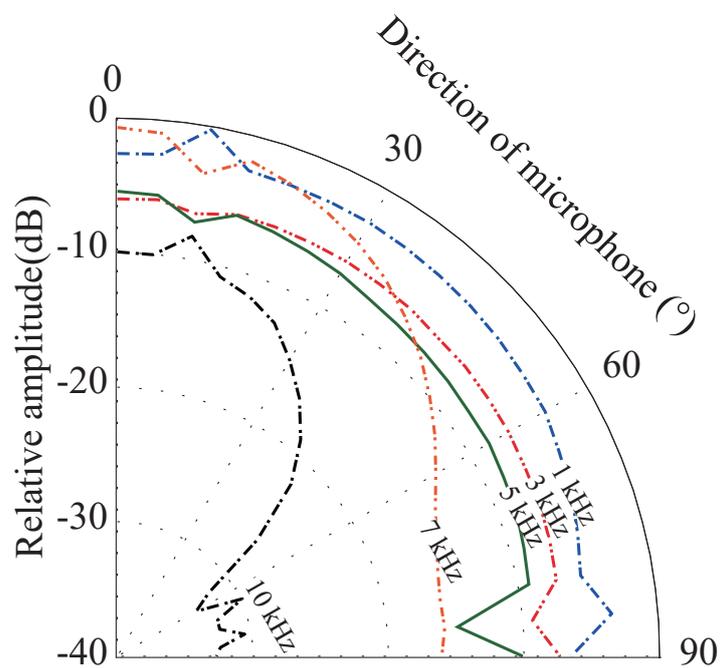


Fig 2.3: SP の様々な周波数における角度特性 (Directivity of a loudspeaker at each frequency) [45].

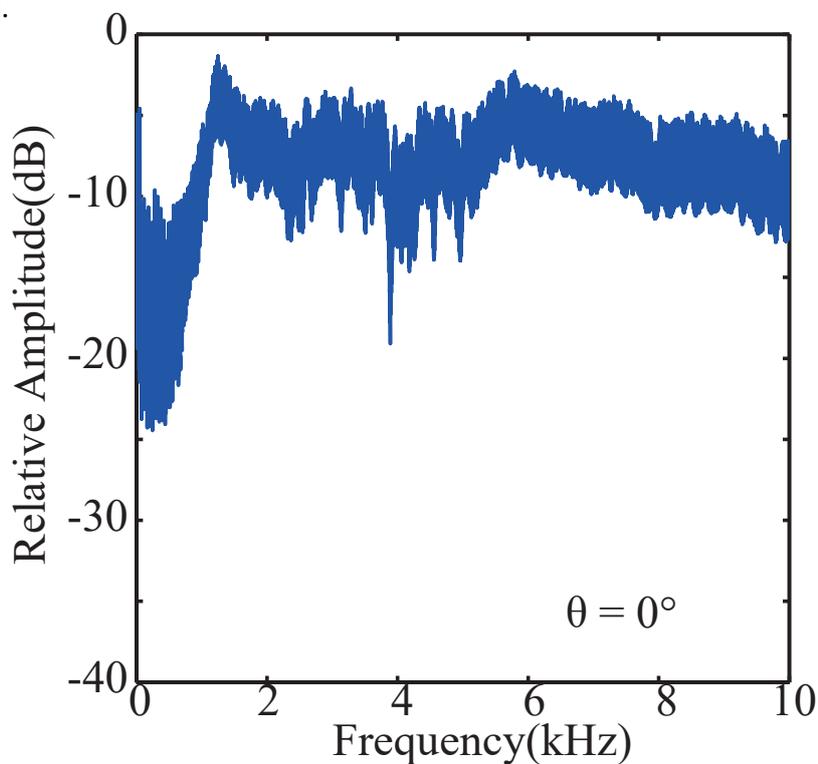


Fig 2.4: SP と MIC の周波数特性 (Frequency characteristic of SP and MIC) [45].

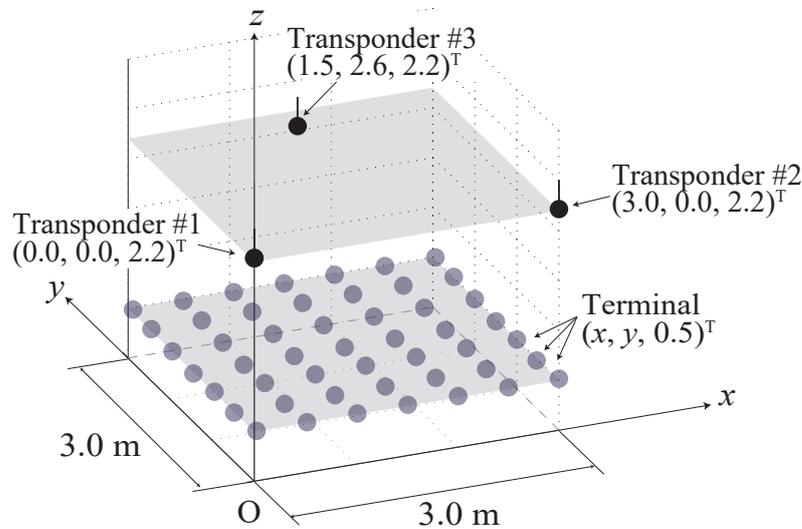


Fig 2.5: 実験系の概要 (Overview of experimental environment) [45].

続いて、同様の配置において、SPとMICの周波数特性を調べるため、アップチャープ信号(掃引周波数5 Hzから20 kHz)の送受信を行った。信号長は1秒とし、10回ずつ計測を行った。Figure 2.4に周波数特性の結果を示す。

Figures 2.3及び2.4より、本実験系において適切な周波数帯域は、1-7 kHz程度であることが確認できた。そのため、信号の搬送波周波数を5 kHzに設定し、リクエスト信号及びレスポンス信号に適用した。

次に、Figure 2.5に音響測位の実験系を示す。TOFの計測信号には、7次(チップ時間0.5 ms)のM系列符号を5 kHzの搬送波周波数で変調して、リクエスト信号及びレスポンス信号を計算した。なお、各トランスポンダには、固有のM系列符号のフィードバックタプル(7, 5, 4, 3, 2, 1, 0), (7, 3, 0), (7, 3, 2, 1, 0)をそれぞれトランスポンダ#1, #2, #3に割り当てた。ここで、M系列同士の相互の干渉の影響を低減するため、M系列は、相互の干渉の少ないプリファードペアを用いている。さらに、A-D/D-Aコンバータのサンプリング周波数は、50 kHzと設定した。上記の機材及びパラメータを用いて、端末の位置を49箇所変化させ、端末と各トランスポンダ間のTOFを10回ずつ計測して端末と各トランスポンダ間の距離を計算し、トランスポンダの位置情報と複数の距離情報を用いて端末の測位を行った。

実験手順をFig. 2.6に示す。測位実験は、(a) 応答信号の干渉が無い場合(各トランスポンダ毎にTOFを個別計測)、(b) 干渉が有る場合(信号調整無し)のTOF同時計測、(c) 干渉が有る場合(信号調整有)のTOF同時計測の3つの条件で行った。

2.4.1 応答信号の干渉が無い場合の性能評価

まず、応答信号の干渉が無い場合の測位実験を行った。この目的は、干渉が無い場合の理想的な条件における性能評価のためである。受信信号の一例を Figs. 2.7(a) に示す。図中の (i) は、送信信号、(ii) 受信信号、(iii) 受信信号と送信信号の相互相関関数である。干渉のない場合の相互相関関数は、Fig. 2.7(a- iii) に示すように明瞭なピーク検出が可能であった。次に、測位実験結果を Figs. 2.8(a) に示す。三角形はトランスポンダの位置、クロスマークは、端末の真の位置、丸印は、推定した端末の位置であり、実線は、端末の真の位置と推定位置との差を示している。受信信号の一例に示されたように、干渉の無い場合は正しい TOF を検出することで、正確な測位結果が示された。測位精度は、干渉が無い場合については、 0.08 ± 0.02 m であった。加えて、Fig. 2.9(a) に端末とトランスポンダの実際の距離と推定した距離の関係を示す。図より、干渉が無い場合において、実際の距離に応じた結果が得られることを確認した。したがって、提案するトランスポンダ方式の TOF 計測は、干渉が無い理想的な場合において、有効であることが示された。

2.4.2 応答信号の干渉が有る場合の性能評価 (信号調整無)

次に、応答信号の干渉が有る場合 (信号調整無) の場合の評価を行った。この目的は、信号レベル調整が有る場合と無い場合で干渉の影響を比較するためである。まず、干渉が有る場合 (信号調整無) の送信信号、受信信号、相互相関関数の一例を Figs. 2.7(b-i) - (b-iii) に示す。Figure 2.7(b-iii) より、信号レベル調整無では、応答信号の干渉により、明確なピークを検出できない場合があることを確認した。

次に、測位実験結果を Fig. 2.8(b) に示す。図より、端末の位置によっては、測位結果にばらつきが生じ、正確な測位が行えないことが判明した。

加えて、Fig. 2.9(b) においても、端末とトランスポンダの距離によっては、測距結果に大きくばらつくことを確認した。Figure 2.8(b) 及び Fig. 2.9(b) から、信号レベル調整が無い場合には、正確な測位が困難であることを確認した。

2.4.3 応答信号の干渉が有る場合の性能評価 (信号調整有)

正確な測位を実現するため、応答信号の干渉が有る場合 (信号調整有) の測位実験を先ほどと同様に行った。まず、干渉が有る場合 (信号調整有) の送信信号、受信信号、相互相関関数の一例を Figs. 2.7(c-i) - (c-iii) に示す。Figure 2.7(c- iii) より、信号調整有の相互相関関数は、干渉が存在した場合においても明瞭なピーク検出が可能であった。

次に、測位実験結果を Figs. 2.8(c) に示す。受信信号の一例と同様に、信号調整有の干渉が存在する場合、正しい TOF を検出することで、正確な測位結果を得られたと考えられる。この条件における測位精度は、 0.08 ± 0.02 m であった。この測位精度は、端末の設置誤差を含めた結果であるが、正確な測位結果が得られていることを示している。

加えて、Fig. 2.9(c) に端末とトランスポンダの実際の距離と推定した距離の関係を示す。Figure 2.9(c) は、理想的な条件である Fig. 2.9(a) と同様な結果を示した。以上から、トランスポンダにおける信号レベル調整は、干渉が存在する場合において有効に機能し、提案手法は、正確な測位を実現可能であることが明らかとなった。

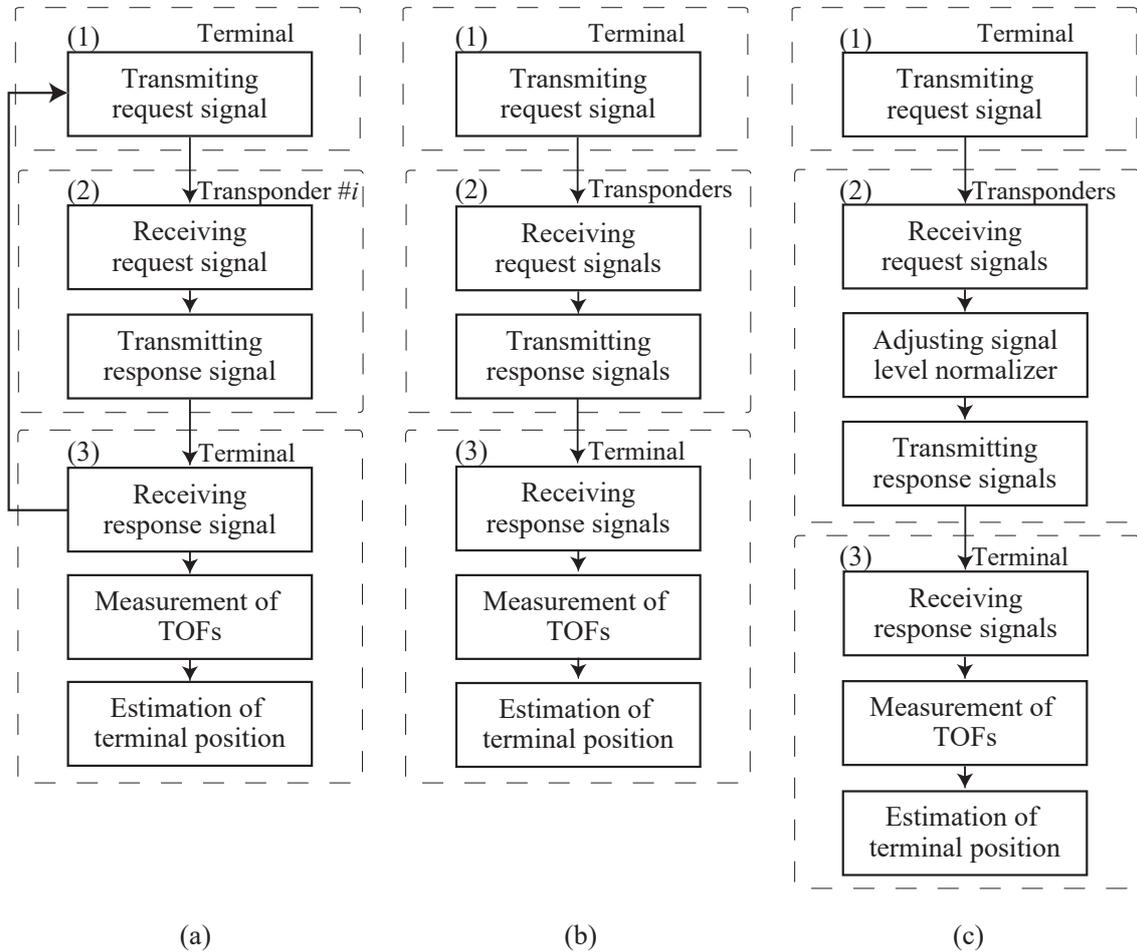


Fig 2.6: 実験手順の概要. (a) Case #1: 干渉の無い場合の測位実験. (b) Case #2: 干渉が有る場合の測位実験 (信号調整無). (c) Case #3: 干渉が有る場合の測位実験 (信号調整有) [Schematic views of experimental procedure. (a) Case #1: Positioning without response signal interference. (b) Case #2: Positioning with response signal interference (without adaptive signal level normalizer). (c) Case #3: Positioning with response signal interference (with adaptive signal level normalizer) [45].

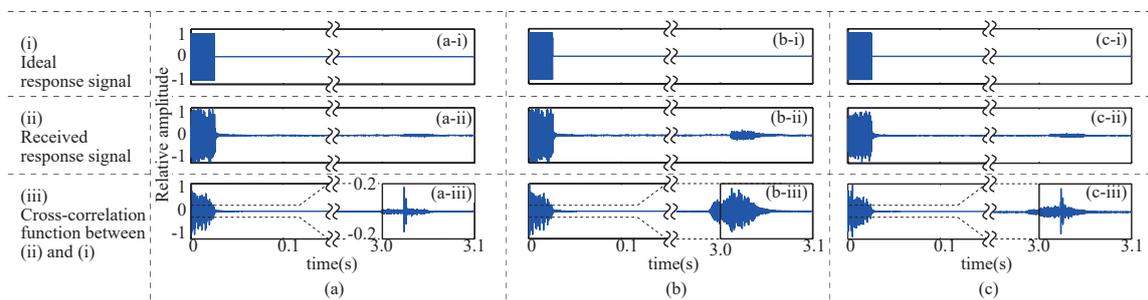


Fig 2.7: 実験から得られた (i) 理想的なレスポンス信号, (ii) 受信したレスポンス信号, (iii) (i) と (ii) から得られた相互相関関数の一例 . (a) Case #1: 干渉の無い場合の測位実験. (b) Case #2: 干渉が有る場合の測位実験 (信号調整無). (c) Case #3: 干渉が有る場合の測位実験 (信号調整有) [Examples of (i) ideal response signal, (ii) received response signal, and (iii) cross-correlation function between (i) and (ii) obtained from experiments. (a) Case #1: Positioning without response signal interference. (b) Case #2: Positioning with response signal interference (without adaptive signal level normalizer). (c) Case #3: Positioning with response signal interference (with adaptive signal level normalizer)] [45].

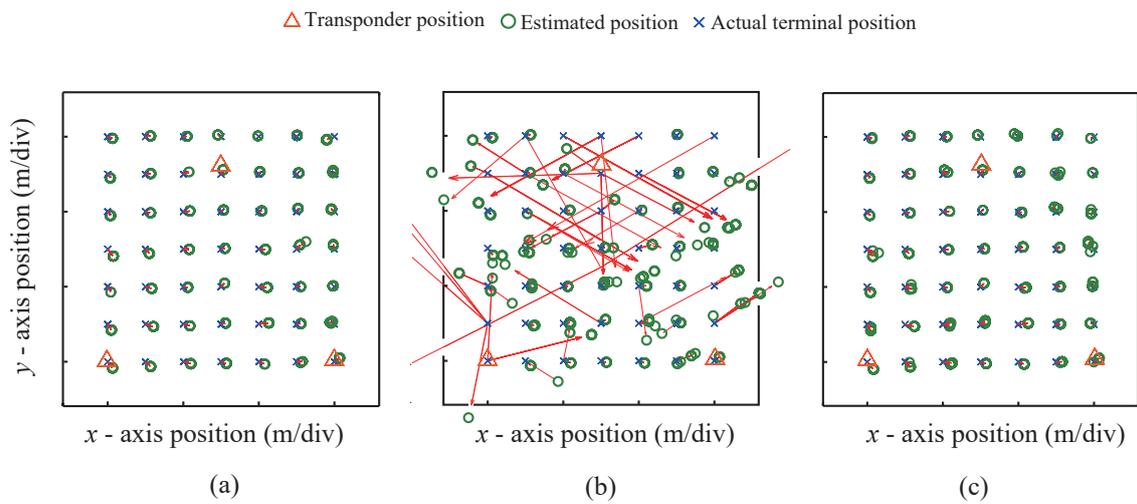


Fig 2.8: 実験から得られた測位結果. (a) Case #1: 干渉のない場合の測位実験. (b) Case #2: 干渉がある場合の測位実験 (信号調整無). (c) Case #3: 干渉がある場合の測位実験 (信号調整有) [Positioning results obtained from experiments. (a) Case #1: Positioning without response signal interference. (b) Case #2: Positioning with response signal interference (without adaptive signal level normalizer). (c) Case #3: Positioning with response signal interference (with adaptive signal level normalizer)] [45].

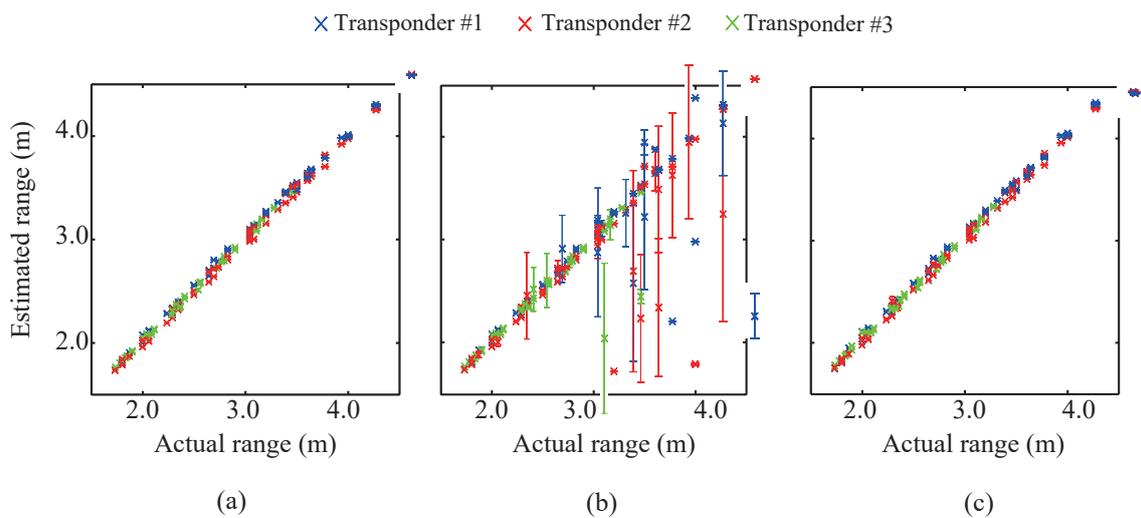


Fig 2.9: 端末とトランスポンダ間の実際の距離と推定した距離の関係. (a) Case #1: 干渉の無い場合の測位実験. (b) Case #2: 干渉が有る場合の測位実験 (信号調整無). (c) Case #3: 干渉が有る場合の測位実験 (信号調整有) [Relationship between actual and estimated ranges between terminal and transponders. (a) Case #1: Positioning without response signal interference. (b) Case #2: Positioning with response signal interference (without adaptive signal level normalizer). (c) Case #3: Positioning with response signal interference (with adaptive signal level normalizer)]. [45]

2.5 まとめ

本章においては，音響測位法における同期対策として，トランスポンダ方式の音響測位法について述べた．提案手法は，非時刻同期で端末トランスポンダ間の TOF を計測し，かつ端末において適切な信号レベルを確保できるような信号レベル調整をトランスポンダにおいて実装しており，干渉が存在する場合にも，正確に測位を行うための工夫を施している．また，無響室において，提案手法の有効性を実験により明らかにし，提案手法の基本性能について確認した．

加えて，一般的な屋内測位システムの導入コストは，手法の違いはあるが十数万円-数百万円程度と幅が広い [49]．提案したトランスポンダ方式を用いる屋内音響測位法において，SP や MIC は，数百円から数千円程度であり，A-D/D-A コンバータの搭載されたマイクロコンピュータ等を用いることにより，端末及びトランスポンダを構築可能である．さらに，屋内施設の放送インフラを併用することなども考慮すると，既存の屋内測位システムと比較して，低コストな導入が期待できると考えられる．

第3章 反射環境における測位実験

3.1 はじめに

前章において、トランスポンダ方式の TOF 計測による音響測位法は、無響室において有効に機能することを確認した。しかし、実際の屋内環境においてトランスポンダ方式の音響測位法を適用する場合を考慮すると、床や壁、障害物等による音波の反射が測位精度に影響を及ぼすことが避けられない。

そこで、本章においては、反射の影響による提案手法の測位精度について検証する [50, 51]。まず、前章で提案した手法をそのまま適用した測位実験を行い、測位に影響する問題を確認する。次に、既存の音響測位法を改良し、改良した手法を用いて性能評価を実施する。

3.2 反射環境における性能評価

実験系を Figs. 3.1(a) 及び (b) に示す。実験は、15 m (W) × 25 m (D) × 10 m (H) の屋内環境で行った。端末及びトランスポンダは、一對の無指向性マイクロフォン (DB Products, c9767) 及びスピーカ (Fostex, P650K) から構成され、A-D/D-A コンバータ (National Instruments, USB-6221 or 6259) を介して、PC に接続されている。端末及びトランスポンダの制御や信号の生成に関する主要なパラメータは、前章で示したものと同様とした。測距実験においては、M 系列のフィードバックタップ (7, 5, 4, 3, 2, 1, 0) を M 系列 #0 及び #i とした。測位実験においては、(7, 1, 0) を端末のリクエスト信号に用いる M 系列とし、(7, 5, 4, 3, 2, 1, 0), (7, 3, 0), (7, 3, 2, 1, 0) をそれぞれのトランスポンダのレスポンス信号に用いる M 系列とした。トランスポンダ側の M 系列は、相互の干渉を低減できるプリファードペアな組み合わせとした。ここで、MIC と SP の指向特性および周波数特性について、Fig. 3.2 に示す。図より、本章で用いる MIC、SP においても、前章と同様な特性を有していることから、使用する音響信号の帯域幅を 5 ± 5 kHz に設定した。

測距実験及び測位実験においては、上記のパラメータを用いて、任意の端末の位置において 10 回ずつ TOF を計測した。

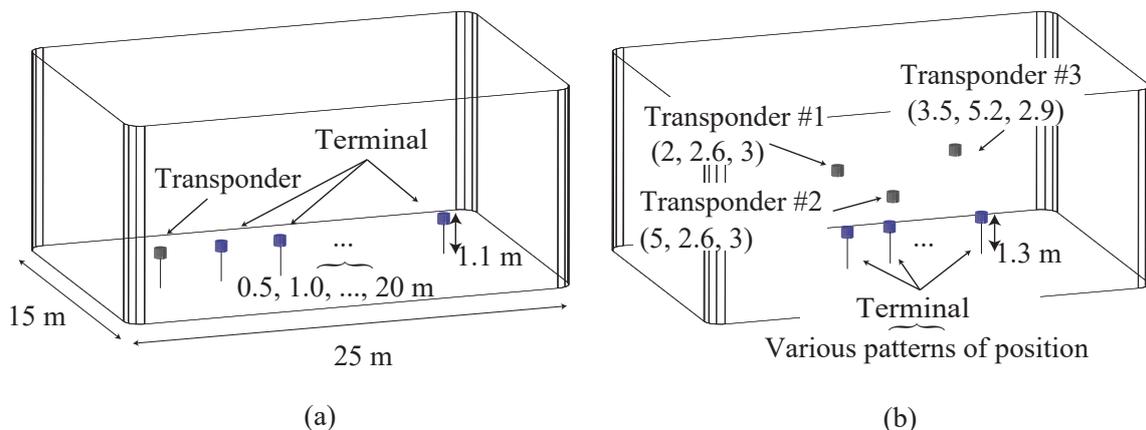


Fig 3.1: 実験系の概要: (a) 測距実験, (b) 測位実験 (Schematic view of experiment system: (a) ranging experiment and (b) positioning experiment) [51].

はじめに、従来手法の計測方法をそのまま用いて測距実験を行った。具体的には、0.5–20.0 (m) の直線上で0.5 m ずつ端末の位置を変えて端末とトランスポンダが対向する状況でTOFを計測した後、端末及びトランスポンダ間の距離を求めた。

ここで、実験環境におけるインパルス応答の計測結果の一例をFig. 3.3に示す。実験環境には、主に直達波と反射波の2つの音波の経路が存在していると考えられる。また、Fig. 3.3において、細線の波形は初期のピークが最大ピークとなった例で、太線の波形は初期のピークが最大ピークとならない例を示している。ここで、図中の d は、端末とトランスポンダ間の水平距離を示している。図より、 d が大きくなるにつれ、直達波よりも反射波のピークが大きくなる場所が存在することが確認できた。

3.2.1 従来手法を用いた実験

従来手法をそのまま用いた場合の測距実験の結果をFig. 3.4に示す。平均の測距誤差及び標準偏差については、 0.16 ± 0.10 mであった。ここで、MICとSP間の距離が10 m以上離れた一部の箇所において測距誤差が大きくなる傾向が確認できた。

これは、TOF計測の際、Fig. 3.3の一例にあるように、一般的にはピークの最大値が実際のTOFと一致するが、端末の位置によっては反射波のピークが直達波のピークを越えてしまうことで、本来のTOFとは異なるピークを検出したことで、測距誤差が生じたのではないかと考えられる。

次に、端末の位置を任意に変更させ、測位実験を行った。測位実験の結果をFig. 3.5に示す。赤線は、端末の推定位置と真の位置との誤差を示している。

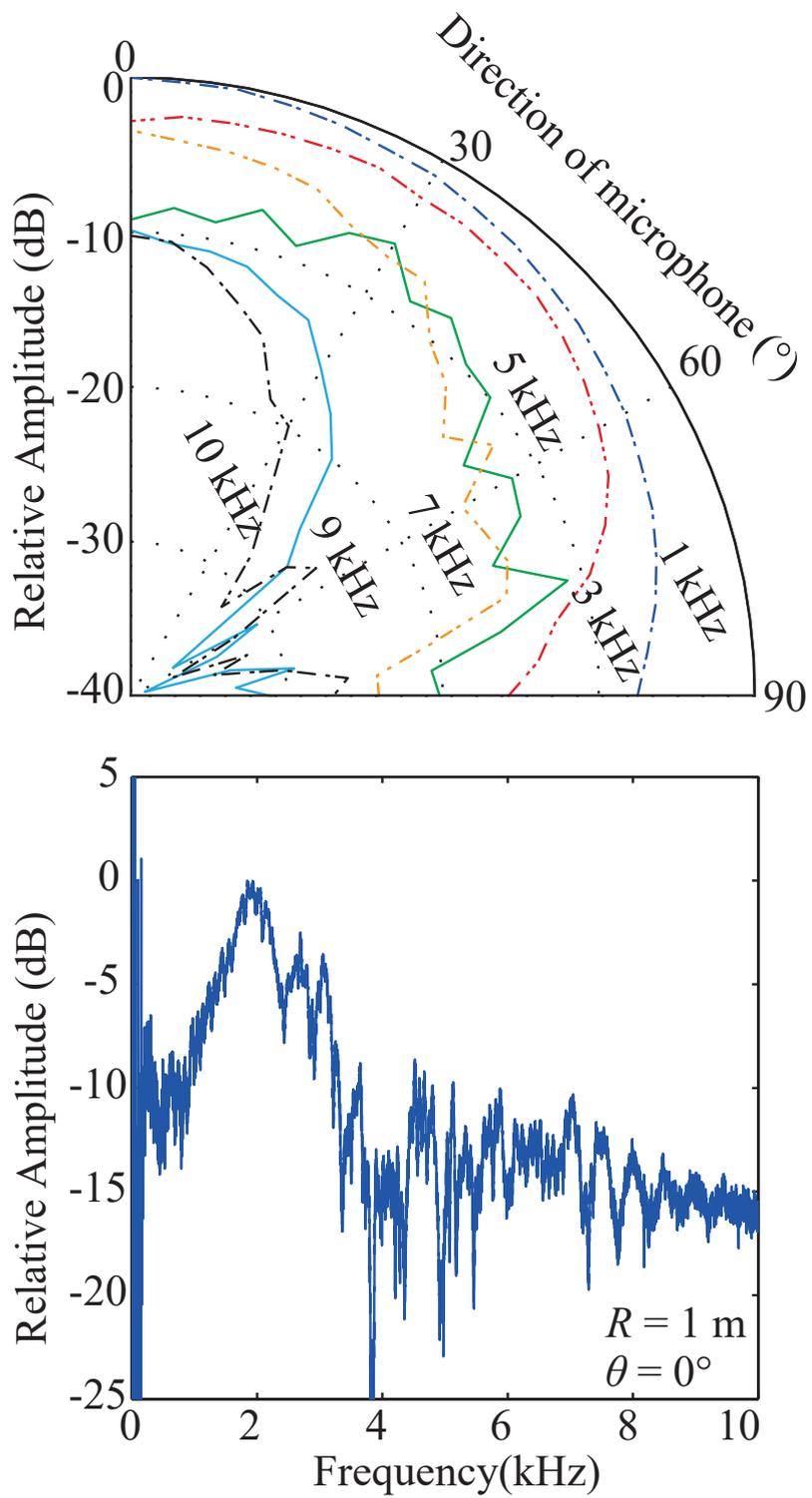


Fig 3.2: MIC と SP の指向特性及び周波数特性 (Directivity and frequency characteristics of MIC and SP) [51].

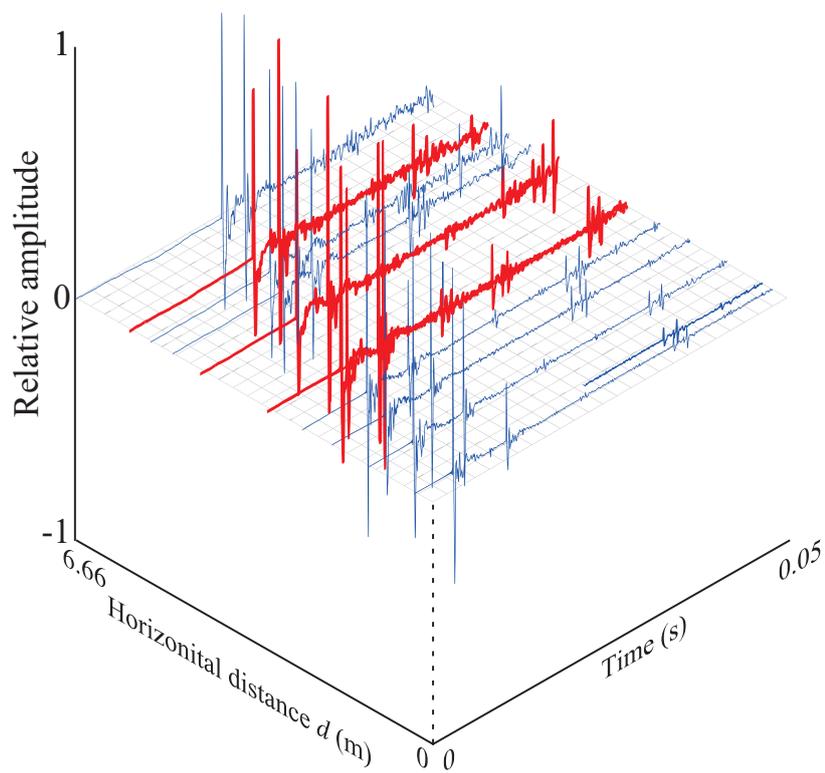


Fig 3.3: 端末とトランスポンダ間のインパルス応答の例 (細線: 直達波が反射波を越えた例; 太線: 反射波が直達波を越えた例) [Impulse responses between the terminal and the transponder (thin: direct signal exceeds the reflected signal; thick: reflected signal exceeds the direct signal)] [51].

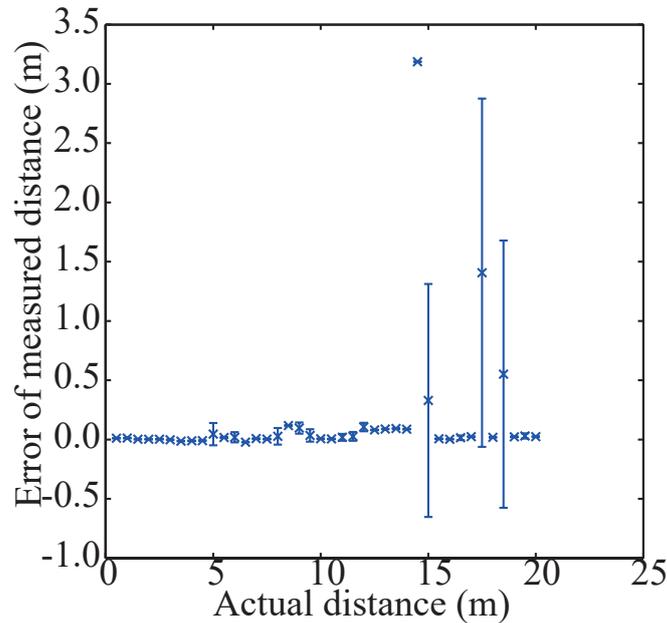


Fig 3.4: 最大ピーク検出を用いた測距結果 (Ranging result obtained using maximal peak detection) [51].

従来手法を用いた測位精度は、 1.38 ± 2.23 m であった。この実験における測位誤差は、TOF の計測誤差が悪化するにつれ、測位精度も同様に悪化したものと考えられる。上記の実験結果から、複数のトランスポンダから同時に信号を受信することを考えると、何らかのピークの検出方法の工夫が必要であることが判明した。

3.2.2 考察

従来手法を用いた実験において、ピークの最大位置検出による TOF 計測及びトランスポンダ側の信号調整は有効に機能していることを確認した。一方で、TOF の計測精度については一部の端末の位置において不十分であった。この原因については、トランスポンダ方式の往復 TOF を計測する際、何らかの計測誤差が生じたと考えられる。

計測誤差の原因を明らかにするため、無響室及び実験室の異なる環境における TOF 計測に関する全ての受信信号の相互相関関数について、注意深く確認した。結果の一例を、Fig. 3.6 に示す。Fig. 3.6(a) は、ある位置における無響室における相互相関関数の例であり、Fig. 3.6(b) は、反射の存在する実験室における相互相関関数の例である。この結果より、Fig. 3.6(a) においては、最大ピークが実際の TOF と一致するが、Fig.

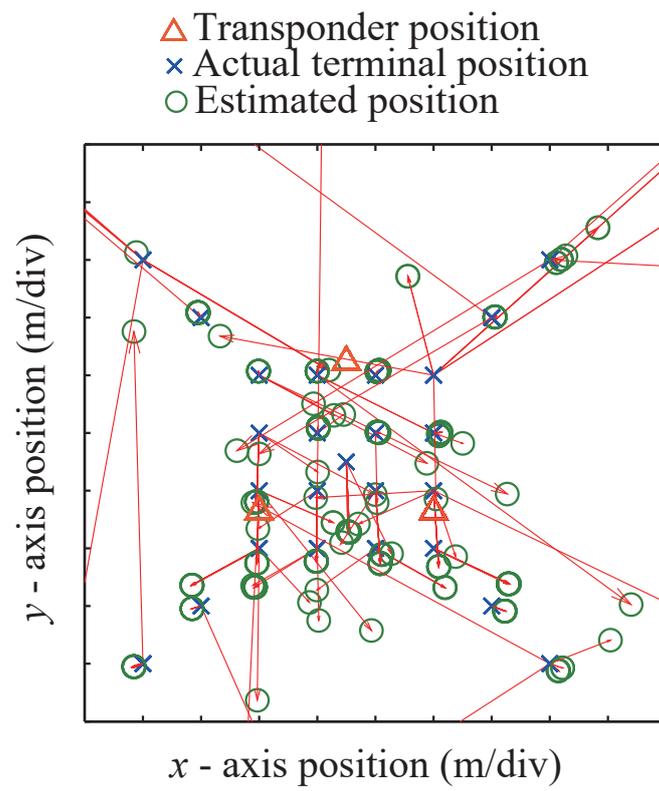


Fig 3.5: 最大ピーク検出を用いた測位結果 (Positioning result obtained using maximal peak detection) [51].

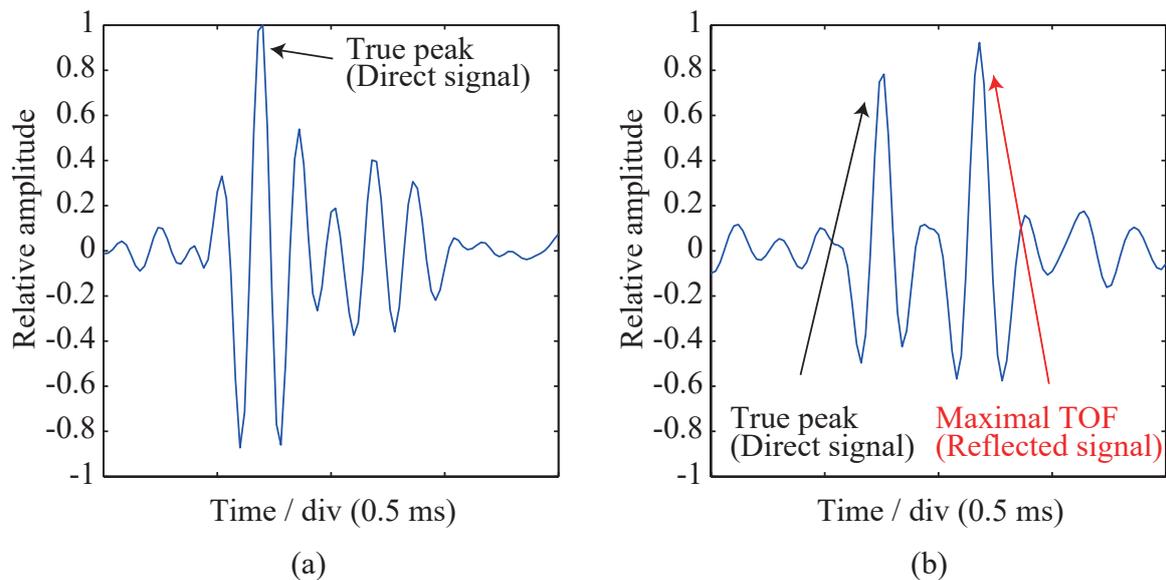


Fig 3.6: 相互相関関数の一例: (a) 無響室及び (b) 実験室 (Example of cross-correlation function: (a) anechoic chamber and (b) room) [51].

3.6(b) のような実環境においては、床から信号が反射してしまい、必ずしも最大ピークが実際の TOF と一致しないことを示している。

ここで、直達波が反射波よりも先に到達するという仮定を行うと、正確な TOF を計測するためには、相互相関関数のピークの最大位置ではなく、初期位置を求めることが望ましい。TOF を精度よく計測することを考えると、相互相関関数のピーク検出において、初期ピークがある閾値を超えた場合を実際の TOF として採用することで、反射対策が実施できると考えられる。

3.3 反射環境における TOF 計測方法の改良

3.2.2 節における考察を元に、反射の影響により生じた複数のピークから、直達波のみを検出するため、常に直達波が受信機において最初に到着するという仮定に基づき、TOF 計測におけるピークの検出方法を改良する。

まず、反射環境における相互相関関数の計算による実験結果から、閾値 TL を設定した。閾値は、相互相関関数のピーク値を C_{\max} とすると、

$$TL = C_{\max} \times \alpha. \quad (3.1)$$

ここで、 α は係数である。式 3.1 において、相互相関関数のピークの値が閾値 TL を超えたならば、反射の影響により、複数のピークが存在する場合においても、 TL 以下の値は無視され、初期ピークの検出により正しい TOF を計測できると考えられる。したがって、端末において適切な閾値を決定できれば、端末において適切な TOF を計測できる。

これまでに得られた実験結果から、閾値のための係数 α は 0.57 と設定した。なお今回は、ピーク検出のための係数を仮に設定したが、測位対象の数や移動速度等に応じて音波の伝搬環境は大きく変化するため、ピーク検出のための閾値は、慎重に決定する必要がある。例えば、移動体対策においては、[34, 37, 38] における周波数ベースの解析方法を組み合わせて、環境に応じて適切な係数を求めることが必要であると考えられる。

3.4 初期ピーク検出方法を用いた測位実験

初期ピーク検出方法を端末及びトランスポンダに実装し、先ほどと同様に測距及び測位実験を行った。まず、測距実験の結果を Fig. 3.7 に示す。測距精度の平均値と標準偏差の関係は、 10.2 ± 3.4 mm であった。図のように、改良したピーク検出手法を用いると、端末とトランスポンダ間の距離が 0.5 m から 20 m の範囲において、精度良く測距が可能であった。

次に、測位実験の結果を Fig. 3.8 に示す。図より、任意の端末の位置において、精度良く端末の位置を推定できていることを確認した。測位精度は、 $7 \text{ m} \times 7 \text{ m}$ の範囲において 0.08 ± 0.01 m 程度であった。

さらに、端末の位置推定の誤差と端末トランスポンダの中心からの距離 d_c との関係を図 3.9 に示す。この図より、位置推定の誤差の標準偏差は小さいが、 d_c が大きくなるにつれて位置推定の誤差が大きくなることが確認できた。誤差が大きくなる原因については、SP の指向特性 (Fig. 3.2) と、端末トランスポンダ間の Signal-to-noise-ratio (SNR) による影響が考えられる。これは、 d_c が大きくなるにつれて端末トランスポンダ間の指向特性が SNR を減少させ、端末における受信信号のレベルを悪化させた結果、生じたとも考えられる。

以上の実験結果から、反射環境における TOF の計測では、最大ピーク検出よりも初期ピーク検出の方が、有効であることが明らかとなった。

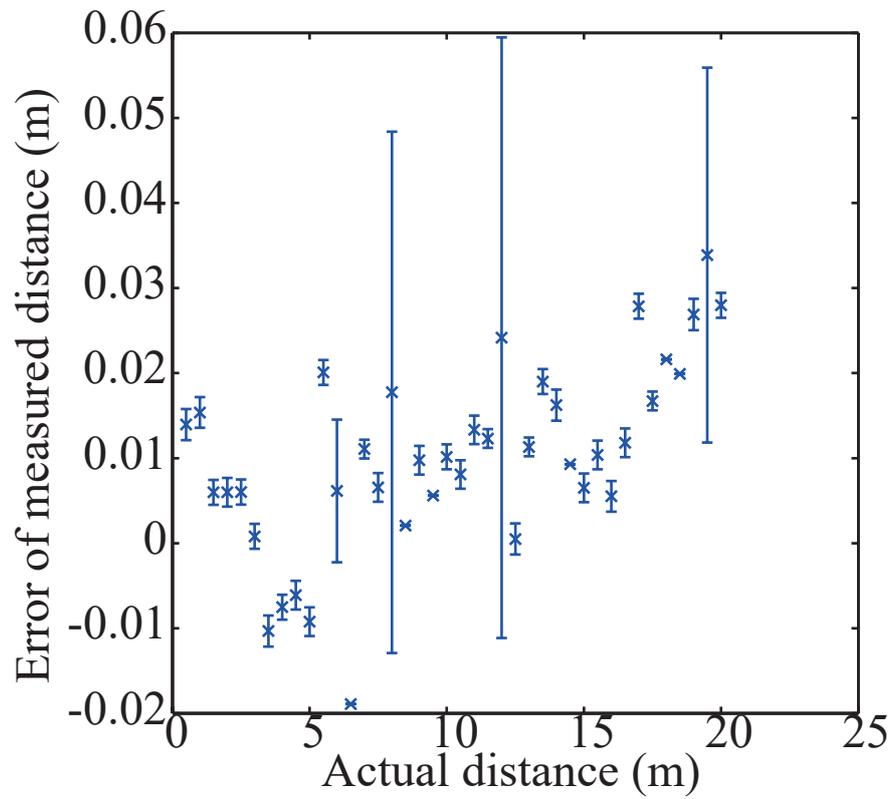


Fig 3.7: 初期ピーク検出を用いた測距実験の結果 (Ranging result obtained using first peak detection) [51].

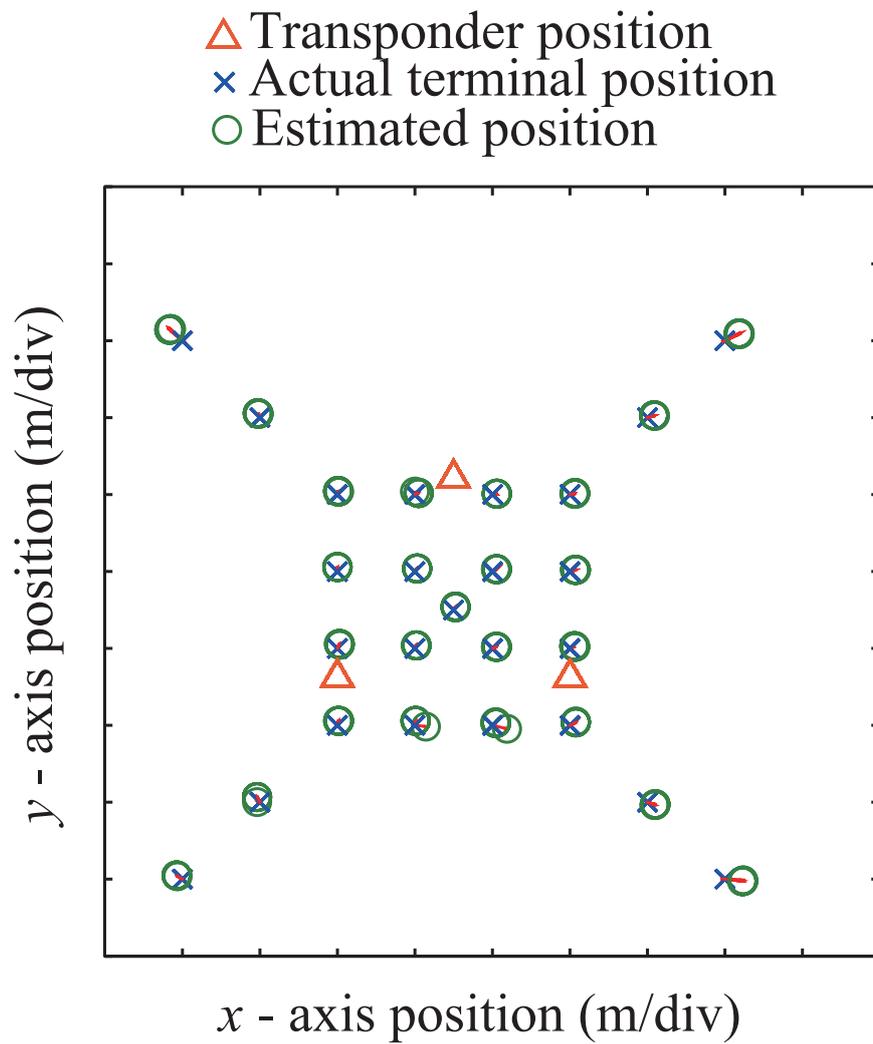


Fig 3.8: 初期ピーク検出を用いた測位実験の結果 (Positioning result obtained using first peak detection) [51].

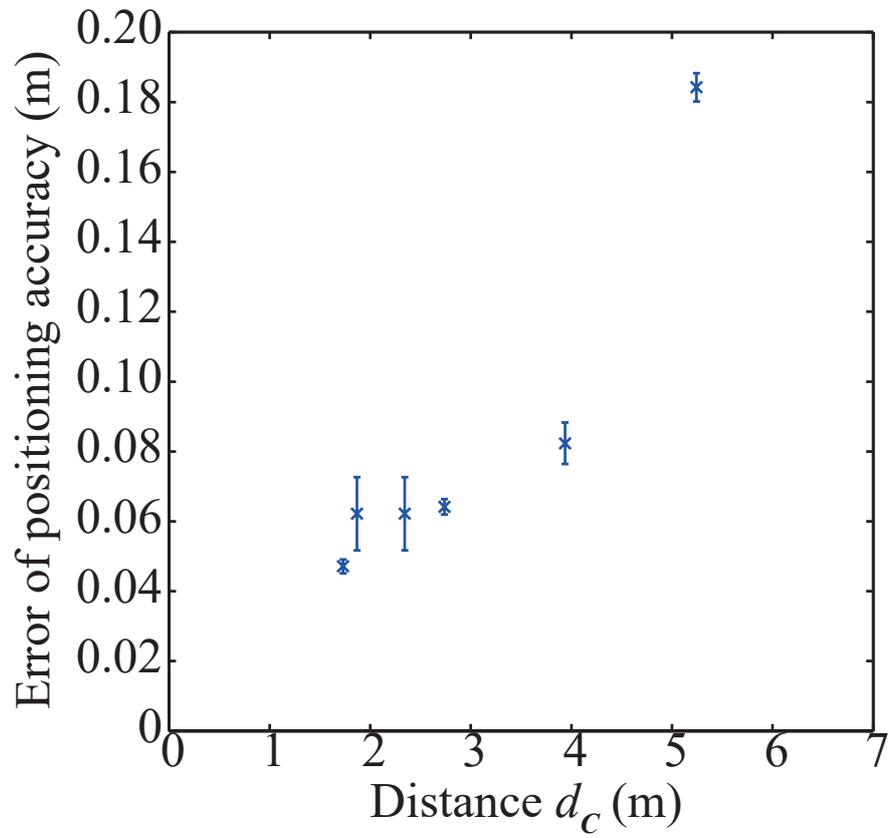


Fig 3.9: 端末の位置推定の誤差と端末トランスポンダの中心からの距離 d_c との関係 (Average positioning error of estimated terminal position versus distance d_c between the terminal and the center of transponders in positioning experiment) [51].

3.5 まとめ

本章においては、トランスポンダ方式を用いる音響測位法における反射の影響と有効な測位範囲を明らかにすることを目的として、実際の大きな部屋において測位実験を行い、反射環境における TOF の計測方法を改良した。はじめに、従来手法を用いた測位実験を行った。実験の結果、反射の影響により、TOF 計測において複数のピークが存在することで、ピークの誤検出が生じてしまい、測位精度が悪化することが判明した。

そこで、無響室及び実験室において、端末トランスポンダ間のインパルス応答を確認したところ、実験室においては、床面からの反射の影響により複数のピークが生じてしまい、従来手法である最大ピーク検出では精度よく TOF を計測できないことを確認した。そこで、直達波が最初に受信機に到達するという仮定の下、初期ピークの検出方法を導入し、従来のピーク検出方法を改良した。さらに、改良したピーク検出方法を端末及びトランスポンダに対して実装し測位実験を行った。改良した手法を用いた実験の結果、精度良く測位できることを示し、反射対策の有効性を確認した。

第4章 移動体の測位実験

4.1 はじめに

これまでの実験により，トランスポンダ方式の測位は，端末を静止させて TOF を計測するような環境においては，有効に機能した．しかし，移動体測位においては，トランスポンダ方式の往復 TOF を計測する際，以下の 2 点の問題が測位に影響すると考えられる．

一点目は，移動に伴うドップラシフトによる影響である．これは，端末の移動に伴うドップラ効果により，相互相関関数のピーク対パワー比 (Peak-to-power-ratio: PAPR) が低下してしまうことで，TOF 計測において，ピーク検出を正しく行えずに，計測誤差の発生が懸念される．

二点目は，往復 TOF 計測におけるオフセットの影響である．これは，端末がリクエスト信号を送信して，一定の遅延時間の後にレスポンス信号を受け取る際の往復 TOF の計測において，TOF の計測にオフセットが生じてしまい，精度が悪化する問題である．

これらの問題について，まず，従来手法を用いて移動体測位における影響を調査し，どの程度の移動速度まで測位が可能であるか検証する [52]．次に，移動体測位において生じる問題について明らかにした上，ドップラシフトした参照信号の相互相関関数を計算することで，移動体測位の問題点の解決を行う [53]．

4.2 従来手法を用いた移動体測位

まず，端末が移動する際の音響測位への影響を調べるため，TOF 計測において，移動速度に応じた相互相関関数の大きさの変化についてシミュレーションを行った．シミュレーションについては，サンプリング周波数 50 kHz，キャリア周波数 5 kHz，7 次の M 系列で変調した信号を用いて，移動速度が 0 から 0.12 m/s 間隔で，最大 1.20 m/s の移動速度を想定した．この移動速度については，人の一般的な歩行速度が 1 m/s 程度であるため，その付近の値に設定した．移動によるドップラシフトした受信信号の生成については，移動速度に応じた送信信号の信号をリサンプリングを行うことで実

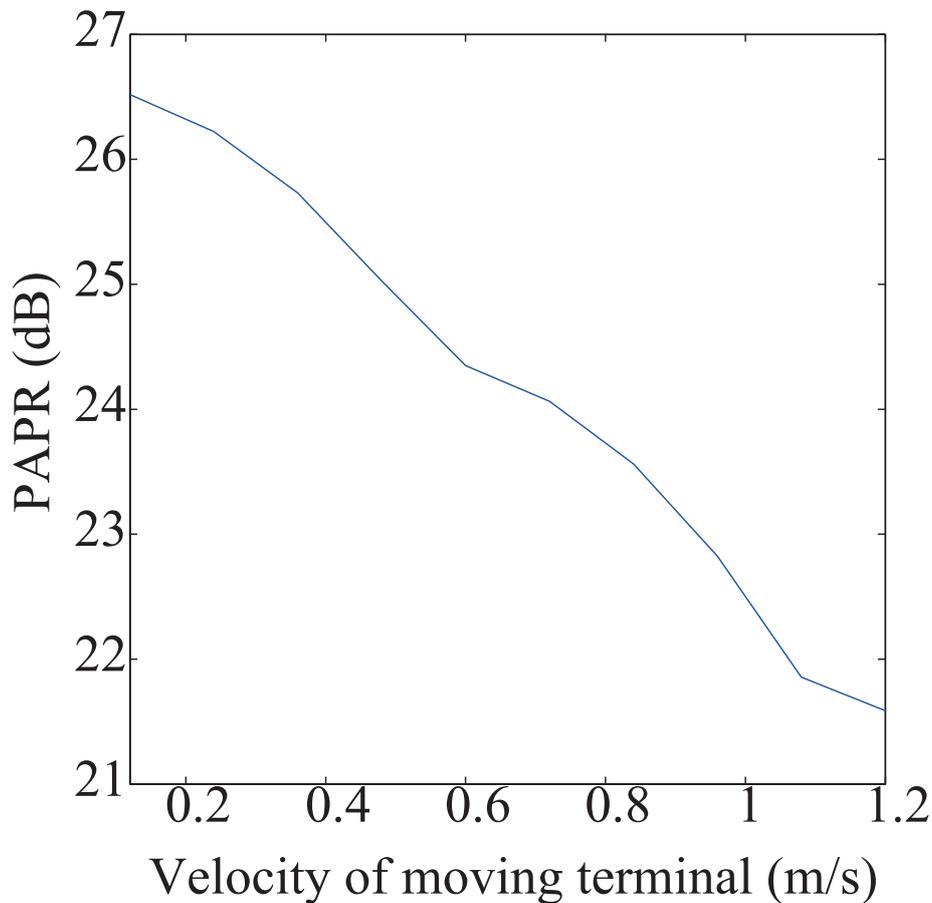


Fig 4.1: シミュレーションにおける端末の移動速度と PAPR の関係 (Simulations of velocity of moving terminal versus PAPR) [52].

現した．移動体測位における評価指標としては，受信信号と送信信号との相互相関関数における Peak-to-average-power-ratio (PAPR) に注目した．ここで，PAPR は，

$$PAPR = \frac{\max(f(\tau)^2)}{\text{mean}(f(\tau)^2)}. \quad (4.1)$$

τ は，時間差， $f(\tau)$ は，受信信号と送信信号の相互相関関数であり，PAPR は， $f(\tau)$ の最大パワーと平均パワーの比となっている．

移動速度に応じた PAPR の変化を Fig. 4.1 に示す．横軸は端末の移動速度，縦軸は PAPR の大きさを示している．図より，端末の移動速度が大きくなるにつれ，PAPR が低下することを確認した．TOF 計測において，相互相関関数のピーク値の低下は，計測誤差の増大につながるのではないかと推測される．

次に，従来手法を用いた実験により，移動体測位におけるドップラシフトの影響を

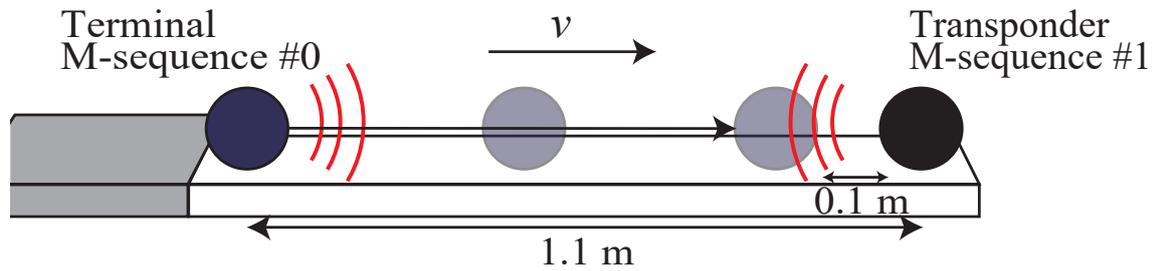


Fig 4.2: 実験系の概要 (Schematic view of experiment set up).

確認する．シミュレーションと同様の条件を用いて，端末がトランスポンダに近づくという実験系を構築した．(Fig. 4.2) 実験における各種機材については，前章と同様のものを用いた．

端末の移動については，単軸ロボット上 (Misumi, RSB2, 1.2 m) に端末を固定しており，端末がトランスポンダに接近する状況において移動速度毎，10 回ずつ TOF 計測を行った．

Figure 4.3 に受信信号の一例を示す．(i) は送信信号，(ii) は受信信号，(iii) は (i) と (ii) の相互相関関数であり，(a) $v = 0.12$ m/s，(b) $v = 0.24$ m/s，(c) $v = 0.96$ m/s という条件での結果を示している．

特に，Figs. 4.3(a-iii) - (c-iii) において，相互相関関数において，ピーク検出が可能であることが期待できる一方，端末の移動速度が大きくなるにつれて，PAPR が低下することが示唆された．

次に，端末の移動速度と PAPR の関係を Fig. 4.4 に示す．図より，端末の移動速度が大きくなるにつれ，PAPR が低下することを確認した．この PAPR の低下は，TOF 計測の誤差につながる可能性があると考えられる．

最後に，端末とトランスポンダ間の真の距離と TOF 計測から推定した距離との関係を Fig. 4.5 に示す．横軸は，真の端末とトランスポンダ間の距離を示しており，縦軸は推定した距離を示す．図より，端末の移動速度が大きくなるにつれ，TOF 計測において，ランダムな誤差が増大し，かつ，TOF 計測におけるオフセットが大きくなることが確認できた．

以上の実験から，トランスポンダ方式を用いる移動体測位において，端末の移動速度が大きくなるにつれ，TOF 計測のランダムな誤差とオフセットの影響が生じることが確認できた．

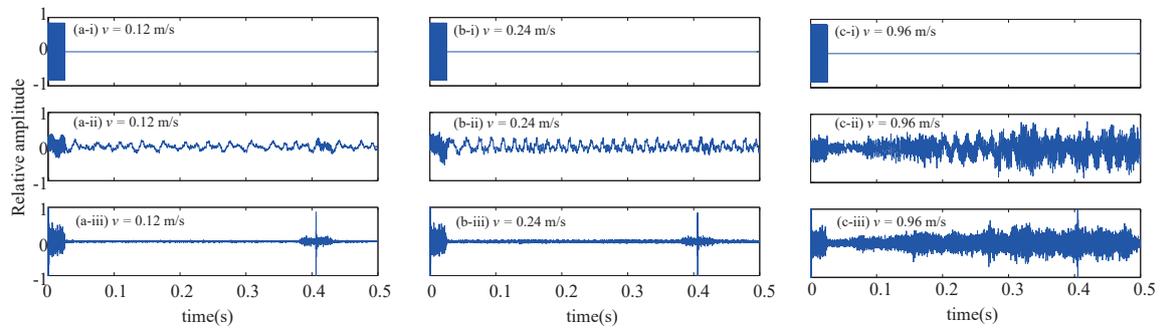


Fig 4.3: 信号処理の一例; (i) 送信信号, (ii) 受信信号, (iii) (i) と (ii) の相互相関関数, (a) $v = 0:12$ m/s, (b) $v = 0:24$ m/s, and (c) $v = 0:96$ m/s [Examples of signal processing; (i) transmitted response signal, (ii) received response signal, (iii) cross-correlation between (ii) and (i), (a) $v = 0:12$ m/s, (b) $v = 0:24$ m/s, and (c) $v = 0:96$ m/s] [52].

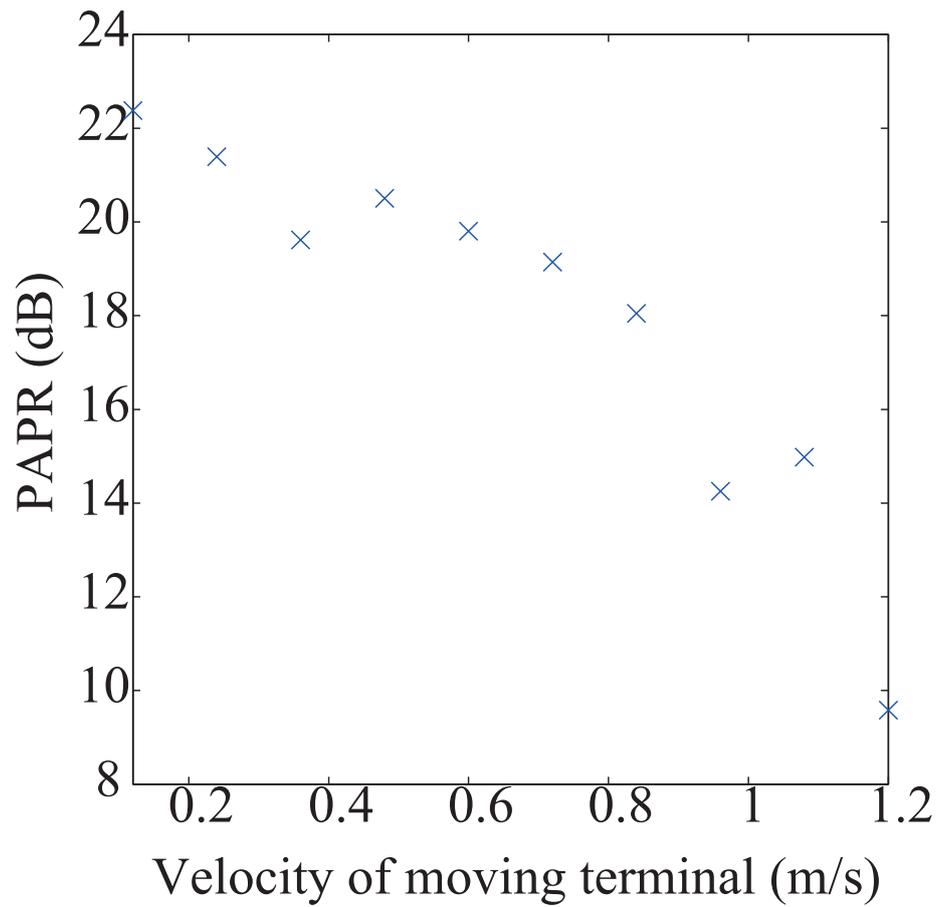


Fig 4.4: 端末の移動速度と PAPR の関係 (Relationships between velocity of moving terminal and PAPR) [52].

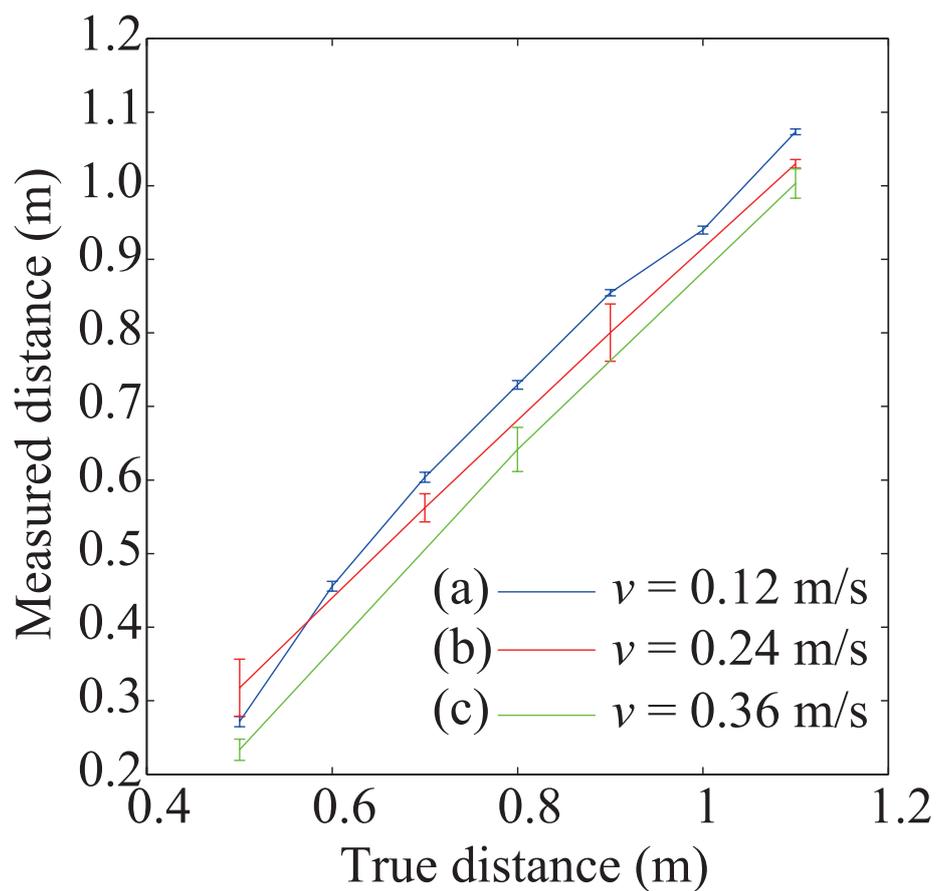


Fig 4.5: 端末の移動速度に応じた測距結果と真の距離との関係; (a) $v = 0.12$ m/s, (b) $v = 0.24$ m/s, (c) $v = 0.36$ m/s (Relationships between measured distance and true distance in various velocity of terminal movement; (a) $v = 0.12$ m/s, (b) $v = 0.24$ m/s, (c) $v = 0.36$ m/s) [52].

4.3 移動体測位における対策

前節において、トランスポンダ方式の移動体測位において、ランダムな誤差とオフセットが生じることが明らかになった。測位精度を悪化させる一因として、ドップラシフトの影響を考慮しなければならないと考えられる。そこで、移動体測位における対策として、移動速度を考慮したドップラシフト信号を相互相関関数の計算時に参照信号として用いることを考える。

例えば、端末がトランスポンダに対して接近する場合を考える。端末が、ドップラシフトした信号を端末が受ける時、端末における受信信号長 T_R は、

$$T_R = \frac{c}{c + v_O} T_T. \quad (4.2)$$

と表される。ここで、 c は音速であり、 v_O は、端末の速度、 T_T は、送信信号の信号長である。このような移動速度に応じて時間伸縮した信号を相互相関関数を計算する際の参照信号として用いることで、移動体測位における PAPR の低下するような状況の解決を試みる。

4.4 移動体測位における性能評価

Figure 4.6 に実験系の概要について示す。実験は無響室において行った。端末とトランスポンダは、単軸ロボット (Misumi RSB2, 1.2 m) 上に設置した。移動体の測距実験を、様々な速度 v (0.12, 0.60, 1.20 m/s) に設定し、端末がトランスポンダに対して接近する状況を生起させ TOF 計測を行った。その他の各種パラメータは、前章と同様なものを利用した。計測回数は 10 回とし、TOF 計測後に受信信号を解析し、PAPR 及び端末の位置について求めた。

計測により得られた PAPR を Figs. 4.7 (a) 及び (b) に示す。Figure. 4.7 (a) は、従来法による結果であり、Fig. 4.7 (b) は、ドップラシフト参照信号による結果である。図より、従来法と比較して端末の移動速度が増加する場合、提案法を用いた場合の PAPR 及びその標準偏差は、0.60, 1.20 m/s において小さくなることを確認した。端末の移動速度が大きくなるにつれて、PAPR の低減防止及び分散が小さくなるということから、提案法を用いることで、移動体測位の際の補正が有効であると考えられる。

次に、測距実験結果について Figs. 4.8 (a) 及び (b) に示す。図より、端末の移動速度が 1.20 m/s の場合、従来法と比較して測距誤差及びその標準偏差は小さくなることを確認した。提案法を用いた場合の計測誤差は、0.05-0.20 (m) 程度生じることが判明した。

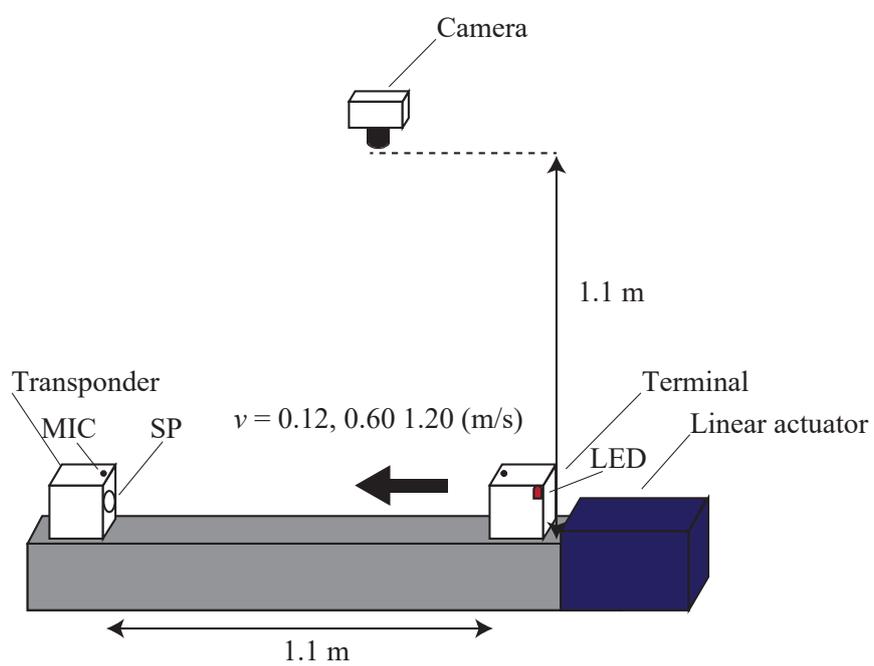


Fig 4.6: 実験系の概要 (Experimental setup) [53].

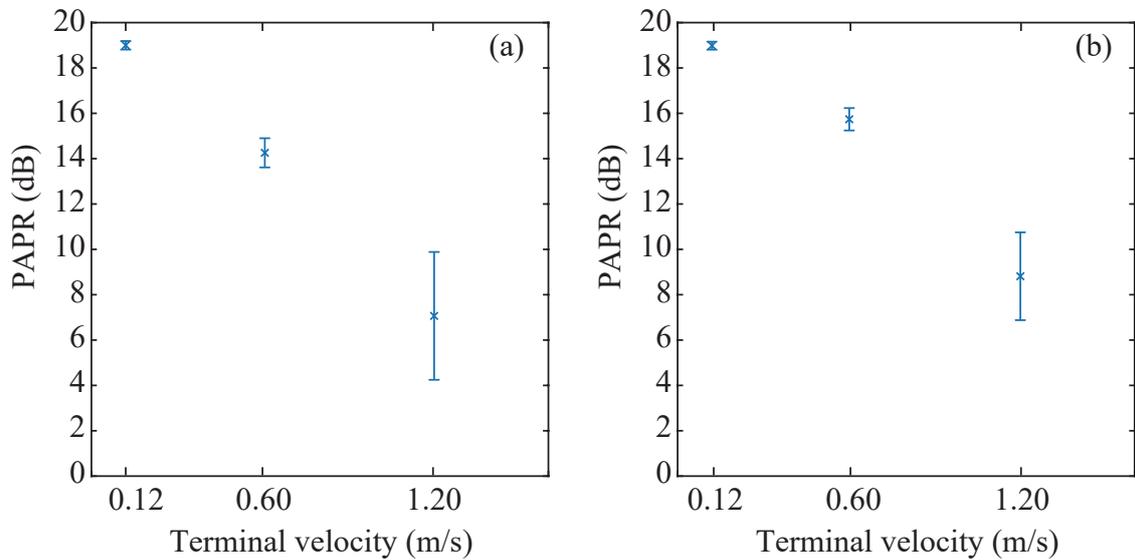


Fig 4.7: PAPR (a) ドップラ補正無 ,(b) ドップラ補正有. [PAPR (a) without Doppler shift correction and (b) with Doppler shift correction] [53].

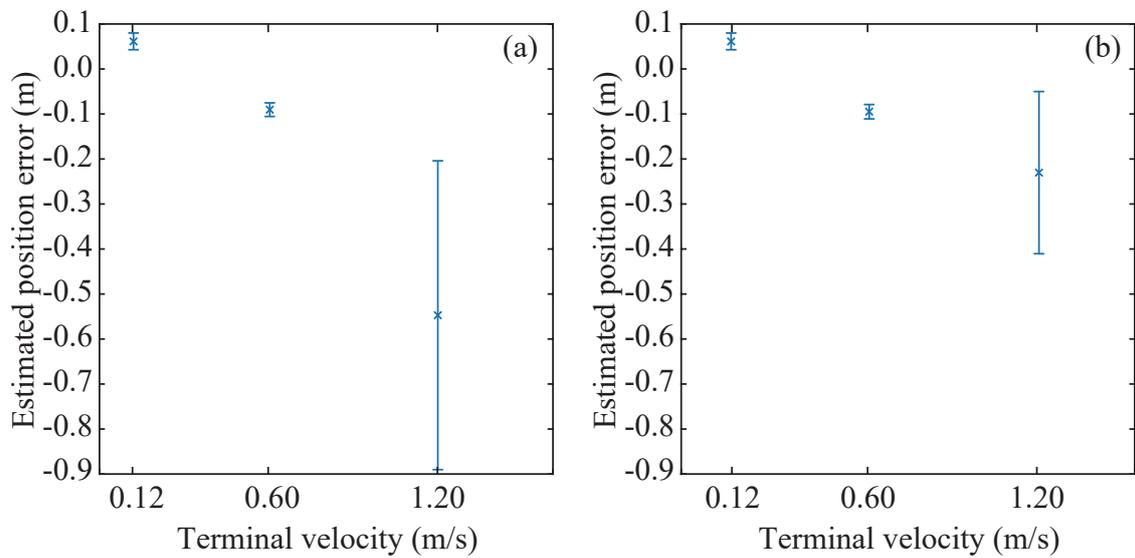


Fig 4.8: TOF から得られた端末位置の誤差 (a) ドップラ補正無 ,(b) ドップラ補正有 [Error of terminal position obtained from TOFs (a) without Doppler shift correction and (b) with Doppler shift correction] [53].

4.5 まとめ

本章においては、移動体測位における影響について、実験により調査し、その検討について検討した。はじめに、移動体測位における影響について述べ、PAPR や測位精度を検証する必要があることを述べた。次に、ドップラシフトした参照信号を TOF 計測の際に用いることで、PAPR や測位精度の対策方法を検討し、移動体の測距実験を行った。さらに、従来手法と移動体対策を行った場合の測距実験結果を比較し、移動体対策を行った場合、1.20 m/s において、ドップラシフトした参照信号を用いて相互相関関数を計算することの有効性を確認した。

第5章 結論

5.1 研究成果の概要

本研究の目的は、低コストかつ広範囲を十分な精度で測位可能な音響測位法の確立である。

第2章においては、非時刻同期のトランスポンダ方式を用いる測位方法の基本設計を行った。また、無響室における測位実験の結果、信号の干渉が存在する場合に測位精度が悪化することが判明したため、トランスポンダに信号調整機能を実装することで測位精度の改善を行った。その結果、3つのトランスポンダを用いて、 $3\text{ m} \times 3\text{ m} \times 2.2\text{ m}$ の無響室において、 0.1 m 程度の測位精度で測位が可能であることを示した。

第3章においては、実際の屋内環境における反射対策を実装し、測位実験による性能評価を行った。まず、従来手法をそのまま用いて測位を行い、反射対策を検討した。検討の結果、直達波の初期ピークを検出することで十分な精度で測位が可能であることを明らかにし、反射の影響がある場合にもトランスポンダ方式の音響測位法は3つのトランスポンダを用いて、 $7\text{ m} \times 7\text{ m} \times 3\text{ m}$ の屋内環境において、 0.1 m 程度の測位精度で測位が可能であり、提案手法が有効に機能することを示した。

第4章においては、移動体測位における検討を行った。まず、従来手法をそのまま適用し、移動体測位における影響を調査した。その結果、トランスポンダ方式の音響測位法において、TOF計測において、ドップラシフトに起因するランダムな誤差とオフセットが生じることが明らかになった。そこで、移動体測位における対策を検討し、ドップラシフトした参照信号を用いてTOF計測を行うことで、PAPR及び測位精度が改善することを明らかにした。改善した手法を用いた測距実験の結果、 1.2 m/s で端末が移動する場合においても、 0.2 m 程度の精度で測距が可能であることを示した。

提案した音響測位法は、市販のスピーカ、マイクロフォンが搭載された放送設備やスマートフォン等を用いて構成することが可能であるため、屋内施設の既存の放送インフラや、ユーザのスマートフォン等を利用することを前提とすると、数十万円から数百万円程度の導入コストのかかる既存の屋内測位システムと比較して、低コストで導入できると考えられる [49]。

また、提案する音響測位法は、既存の超音波を用いる測位システムよりも、広い範

囲をカバーし0.1 m程度という十分な測位精度で屋内測位が実現可能である．加えて，移動体測位においても，端末が1.2 m/s程度で移動する場合においても，測位が可能である．

以上から，屋内音響測位における時刻同期，干渉，反射，移動体対策を行うことで，基礎的な屋内音響測位法が確立されたと考えられる．今後においては，提案手法を用いて大規模屋内空間における数十 cm程度の詳細なナビゲーションや，工場内における作業ロボットや屋内環境を調査するドローンの測位等の実現に寄与できると考えられる．

5.2 残された課題

本研究において，残された課題は下記の通りである．まず，様々な屋内環境に適した最適な音源配置の検討である．この問題を解決するためには，マイクロフォンやスピーカの指向特性や周波数特性等の音響特性や，屋内環境における音波の反射特性をモデル化した上，屋内音響測位において有効な測位範囲とセンサ数，配置の関係を明らかにすることが必要であると考えられる．

また，移動体測位において，人の歩行速度の1.20 m/s程度では，トランスポンダ方式の音響測位法が機能することが確認できたが，インフラ点検用のドローンや，屋内作業ロボットの測位においては，より速い速度での測位の必要性も考えられるため，より速い移動体測位のために利用する音響信号の変調方式についても検討する必要がある．

加えて，本研究においては，できるだけ少数の素子を用いて屋内音響測位を実現することを考えていたが，マイクロフォンアレイやスピーカアレイの構築により，音源の到来方向推定や，ビームフォーミング等の制御を取り入れることで，広範囲の測位に適用できるのではないかと考えられる．

最後に，複数端末における測位方法の検討である．提案手法は，単体の端末における有効性が明らかとなっている．現状，複数端末が測位を行うためには，トランスポンダのレスポンス信号の送信タイミングを時分割にすることが考えられるが，複数端末に対応した音響信号の変調方式の検討についても必要であると考えられる．

謝辞

本論文は、著者が筑波大学大学院システム情報工学研究科知能機能システム専攻の音響システム研究室に在籍していた際の主要な研究成果をまとめたものです。本論文は、多くの関係各位にご協力いただいたおかげで、執筆することができました。

筑波大学大学院システム情報工学研究科知能機能システム専攻水谷孝一教授には、研究室見学の音響測位に関する研究テーマの紹介に始まり、研究に対する姿勢や科学者としてあるべき姿などを常日頃からご教授いただき、本論文の作成に関してご指導をいただきました。また、博士後期課程に在籍しながら複数の学位の取得を目指すデュアルディグリープログラムについてのご紹介をいただき、普段の専攻とは異なる分野の学問を学ぶきっかけを与えていただきました。厳しくとも温かみのあるご指導をいただいたおかげで本論文を執筆することができました。厚く御礼申し上げます。

筑波大学大学院システム情報工学研究科知能機能システム専攻海老原格准教授には、研究の具体的な進め方や、ソフトウェア、実験機材の取り扱いに関する指導に始まり、思うような研究成果が得られないときも、時間を惜しまずに問題点の解決のため、夜遅くまで付き合っていたいただいたこともございました。また、原稿執筆の際は、多数の有益なご指摘をいただけたおかげで、複数の査読付き雑誌論文にも採録される等、非常にお世話になりました。厚く御礼申し上げます。

筑波大学大学院システム情報工学研究科知能機能システム専攻若槻尚斗准教授には、トランスポンダ方式の音響測位システムの実装に関して当初からご指導をいただきました。また、原稿執筆の際には、夜遅くまでお付き合いいただいたこともあり、大変お世話になりました。普段の研究生活についても、話しやすい雰囲気、雑談に付き合っていたいただき、大変居心地よく過ごさせていただきました。サーバー管理や自動車をはじめとした機械一般に関する深い知識には感服いたしました。先生のご指導がなければ本論文を作成できませんでした。厚く御礼申し上げます。

筑波大学大学院システム情報工学研究科知能機能システム専攻前田祐佳助教には、研究室ゼミ発表時に多数の有益なコメントをいただきました。厚く御礼申し上げます。

筑波大学大学院システム情報工学研究科知能機能システム専攻善甫啓一助教には、研究室ゼミ発表時に屋内測位の専門家の観点から多数の有益なコメントをいただきました。厚く御礼申し上げます。

筑波大学大学院システム情報工学研究科コンピュータサイエンス専攻庄野和宏准教授には、博士論文の審査員として、本論文に関するご意見をいただきました。電子回路の専門家の観点から、多数のご指摘をいただき、本論文を充実させることができました。厚く御礼申し上げます。

防衛大学校電気情報学群電気電子工学科森下久教授には、博士論文の審査員として、本論文に関するご意見をいただきました。予備審査の際には、音響測位における位置付けに関するご指摘をいただき、本論文をより充実させることができました。厚く御礼申し上げます。

防衛大学校応用科学群応用物理学科松元藤彦教授には、大学院受験準備の際に、勉強場所を提供いただき、信号処理に関する講義を開いていただきました。松元先生のおかげで、不安なく、新たな研究環境の確立のための準備をすることができました。厚く御礼申し上げます。

防衛大学校応用科学群応用物理学科大淵武史講師には、大学院受験における配属先の検討の際に、音響システム研究室の紹介をしていただきました。大淵先生のおかげで、同研究室において恵まれた環境で5年間研究することができました。厚く御礼申し上げます。

岐阜工業高等専門学校電子制御工学科小木曾里樹博士、筑波大学計算機科学センター研究員宮本隆典博士、音響システム研究室OBの川岸卓司博士、角間孝一博士、同研究室博士後期課程の青木拓也氏、小林彰人氏、味藤未冴来氏、佐野祐土氏には、学生ゼミの際や日頃から、研究の進め方やプログラムの作成方法、その他様々な相談に乗っていただきました。特に、角間博士、宮本博士には、学生ゼミにおいて、研究生活に不慣れな私に対し、積極的に原稿や研究指導等の支援をしていただきました。大変感謝しております。

同研究室OBの本高雄一朗氏、同研究室所属の茅根涼太郎氏、田島和真氏には、大規模屋内空間における実験機材の設置及び撤収に協力いただきました。皆様のおかげで、実験データを取得することができ、論文を完成させることができました。大変感謝しております。

筑波大学大学院システム情報工学研究科コンピュータサイエンス専攻電子回路研究室藤井達哉氏には、大学院研修の同期として、切磋琢磨しながら学位の取得を目指させていただきました。藤井君のおかげで、デュアルディグリープログラムやつくばマラソンへの挑戦、手作りラジオ制作のボランティア等の課外活動をする機会に恵まれ、研究生活をさらに充実させることができました。大変感謝しております。

防衛省陸上自衛隊の関係各位には、筑波大学大学院において、貴重な5年間の研修の機会をいただきました。この研修で培った技能を組織のために活かすことができるよう、努力してまいります。深く感謝しております。

最後に、妻には大学院における研究生活で不規則な生活をしがちな際に、体調管理をはじめ、積極的に家事や育児のサポートをしていただきました。非常に感謝しております。おかげさまで博士論文を執筆することができました。

参考文献

- [1] Pratap Misra, Per Enge, 原著, 測位航法学会誌, 改訂 第2版 精説 GPS 基本概念・測位原理・信号と受信機. 松香堂書店, 2010.
- [2] 国土交通省. “高精度測位社会プロジェクト”.
http://www.mlit.go.jp/kokudoseisaku/kokudoseisaku_tk1_000091.html,
(accessed 2019.10.16).
- [3] Naohiko Kohtake, Shusuke Morimoto, Satoshi Kogure, and Dinesh Manandhar, “Indoor and outdoor seamless positioning using indoor messaging system and gps”, In *Proceedings of the International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN2011)*, Guimarães, Portugal, pp. 21–23, 2011.
- [4] 水垣健一, “UWB-IR 無線方式による屋内位置検知”, 電子情報通信学会誌= The journal of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, Vol. 92, No. 4, pp. 256–261, 2009.
- [5] 古館達也, 堀川三好, 工藤大希, 岡本東, “Bluetooth low energy ビーコンを用いた屋内測位手法に関する研究”, 第14巻, pp. 311–312, 2015.
- [6] 森永健太, 高田憲一, 北須賀輝明, 山中嘉文, “工場における赤外線を用いた屋内の物品管理手法の提案”, 火の国情報シンポジウム 2013. B-6-3, 2013.
- [7] Noriyuki Sakai, Keiichi Zempo, Koichi Mizutani, and Naoto Wakatsuki, “Linear positioning system based on ir beacon and angular detection photodiode array”, In *Proceedings of the International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, Alcalá de Henares, Spain, pp. 4–7, 2016.
- [8] 中澤陽平, 牧野秀夫, 西森健太郎, 若月大輔, 小林真, 駒形英樹, “ナビゲーションを目的とした可視光通信による屋内歩行者位置計測法”, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. 99, No. 2, pp. 165–177, 2016.

- [9] 興相正克, 大隈隆史, 蔵田武志, “歩行者ナビのための自蔵センサモジュールを用いた屋内測位システムとその評価”, シンポジウム「モバイル」, Vol. 8, pp. 151–156, 2008.
- [10] 森信一郎, 奥山鏡子, 峰野博史, 水野忠則, “地磁気センサを使った高精度測位技術”, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. 93, No. 10, pp. 1894–1902, 2010.
- [11] Andy Ward, Alan Jones, and Andy Hopper, “A new location technique for the active office”, *IEEE Personal communications*, Vol. 4, No. 5, pp. 42–47, 1997.
- [12] Nissanka B Priyantha, Allen KL Miu, Hari Balakrishnan, and Seth Teller, “The cricket compass for context-aware mobile applications”, In *Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking*, pp. 1–14. ACM, 2001.
- [13] 南正輝, 森川博之, 青山友紀, “超音波を用いた自律分散型位置検出システムの設計と実装”, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol. 88, No. 12, pp. 1432–1441, 2005.
- [14] 橋爪宏達, 金子歩, 杉本雅則, “位相一致法による正確な超音波位置認識手法とその特性”, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol. 91, No. 4, pp. 435–447, 2008.
- [15] Yoko Norose, Koichi Mizutani, and Naoto Wakatsuki, “Nondestructive inspection for steel billet using phase-modulated signal by gold sequence for improving measurement speed”, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 51, p. 07GB17, 2012.
- [16] Koichi Kakuma, Yoko Norose, Koichi Mizutani, and Naoto Wakatsuki, “Interval of observation plane in visualization of region near defects in billets using ultrasonic computerized tomography method”, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 52, No. 7S, p. 07HC10, 2013.
- [17] Yoko Norose, Koichi Mizutani, and Naoto Wakatsuki, “Application of ultrasonic computerized tomography using time-of-flight measured by transmission method to nondestructive inspection for high-attenuation billets”, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 53, No. 7S, p. 07KC19, 2014.
- [18] Ayumu Osumi, Tatsunori Saito, and Youichi Ito, “Improved method of imaging defect in noncontact and nondestructive technique by high-intensity aerial burst ultrasonic wave and optical equipment”, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 54, No. 7S1, p. 07HC07, 2015.

- [19] Ryusuke Miyamoto, Koichi Mizutani, Tadashi Ebihara, and Naoto Wakatsuki, “Defect detection and size estimation in billet from profile of time-of-flight using ultrasonic transmission method with linear scanning”, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 54, No. 7S1, p. 07HC11, 2015.
- [20] Ryusuke Miyamoto, Koichi Mizutani, Tadashi Ebihara, and Naoto Wakatsuki, “Effect of mode conversion on defect detection and size estimation in billet from time-of-flight profile by ultrasonic transmission method”, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 55, No. 7S1, p. 07KC06, 2016.
- [21] Koichi Mizutani, Kenta Nishizaki, Keinosuke Nagai, and Kennichi Harakawa, “Measurement of temperature distribution in space using ultrasound computerized tomography”, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 36, No. Part 1, No. 5B, pp. 3176–3177, 1997.
- [22] Ikumi Saito, Koichi Mizutani, and Naoto Wakatsuki, “Two-axis anemometer with acoustic reflector using single pair of loudspeaker and microphone”, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 46, No. 7B, pp. 4537–4540, 2007.
- [23] Ikumi Saito, Naoto Wakatsuki, Koichi Mizutani, Masahisa Ishii, Limi Okushima, and Sadanori Sase, “Measurements of wind velocity and direction using acoustic reflection against wall”, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 47, No. 5, pp. 4329–4332, 2008.
- [24] Yosuke Katano, Naoto Wakatsuki, and Koichi Mizutani, “Air temperature distribution measurement using asynchronous-type sound probe”, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 48, No. 7, p. 07GB03, 2009.
- [25] Hiroshi Nishiguchi, Toshiyuki Sawayama, and Kouki Nagamune, “A propagation time difference evaluation for a clamp-on ultrasonic flowmeter for low-pressure gas”, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 55, No. 7S1, p. 07KB05, 2016.
- [26] 山根章生, 伊与田健敏, 崔龍雲, 久保田讓, 渡辺一弘, “擬似乱数 M 系列によるスペクトル拡散音波の距離計測への応用”, 計測自動制御学会論文集, Vol. 39, No. 10, pp. 879–886, 2003.
- [27] Y. Fukuju, M. Minami, H. Morikawa, and T. Aoyama, “Dolphin: an autonomous indoor positioning system in ubiquitous computing environment”, In *Proceedings IEEE*

- Workshop on Software Technologies for Future Embedded Systems. WSTFES 2003*, pp. 53–56, 2003.
- [28] Atri Mandal, Cristina V Lopes, Tony Givargis, Amir Haghghat, Raja Jurdak, and Pierre Baldi, “Beep: 3d indoor positioning using audible sound”, In *Second IEEE Consumer Communications and Networking Conference, 2005. CCNC. 2005*, pp. 348–353. IEEE, 2005.
- [29] Shinnosuke HIRATA, Minoru Kuribayashi KUROSAWA, and Takashi KATAGIRI, “Cross-correlation by single-bit signal processing for ultrasonic distance measurement”, *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, Vol. E91.A, No. 4, pp. 1031–1037, 2008.
- [30] Masafumi Inba, Hiroataka Yanagida, and Yasutaka Tamura, “Motion detection in ultrasound image-sequences using tensor voting”, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 47, No. 5, pp. 3880–3884, 2008.
- [31] Shinnosuke Hirata, Minoru Kuribayashi Kurosawa, and Takashi Katagiri, “Accuracy and resolution of ultrasonic distance measurement with high-time-resolution cross-correlation function obtained by single-bit signal processing”, *Acoustical Science and Technology*, Vol. 30, No. 6, pp. 429–438, 2009.
- [32] Shinnosuke Hirata and Minoru Kuribayashi Kurosawa, “Ultrasonic distance and velocity measurement using a pair of lpm signals for cross-correlation method: Improvement of doppler-shift compensation and examination of doppler velocity estimation”, *Ultrasonics*, Vol. 52, No. 7, pp. 873 – 879, 2012.
- [33] Keiichi Zempo, Tadashi Ebihara, and Koichi Mizutani, “Direction of arrival estimation based on delayed-sum method in reverberation environment”, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 51, p. 07GB09, 2012.
- [34] Shinnosuke Hirata and Hiroyuki Hachiya, “Doppler velocity estimation based on spectral characteristics of m-sequence-modulated signals in ultrasonic measurement for moving objects”, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 52, No. 7S, p. 07HC06, 2013.
- [35] Keiichi Zempo, Koichi Mizutani, and Naoto Wakatsuki, “Localization of acoustic reflective boundary using a pair of microphones and an arbitrary sound source”, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 52, No. 7S, p. 07HG06, 2013.

- [36] Kotaro Hoshiba, Shinnosuke Hirata, and Hiroyuki Hachiya, “High-accuracy measurement of small movement of an object behind cloth using airborne ultrasound”, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 52, No. 7S, p. 07HC15, 2013.
- [37] Slamet Widodo, Tomoo Shiigi, Naoki Hayashi, Hideo Kikuchi, Keigo Yanagida, Yoshiaki Nakatsuchi, Yuichi Ogawa, and Naoshi Kondo, “Moving object localization using sound-based positioning system with doppler shift compensation”, *Robotics*, Vol. 2, No. 2, pp. 36–53, 2013.
- [38] Yohei Ikari, Shinnosuke Hirata, and Hiroyuki Hachiya, “Ultrasonic position and velocity measurement for a moving object by m-sequence pulse compression using doppler velocity estimation by spectrum-pattern analysis”, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 54, No. 7S1, p. 07HC14, 2015.
- [39] Natee Thong-un, Shinnosuke Hirata, and Minoru K. Kurosawa, “Improvement in airborne position measurements based on an ultrasonic linear-period-modulated wave by 1-bit signal processing”, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 54, No. 7S1, p. 07HC06, 2015.
- [40] 秋山征己, 須永光, 五百蔵重典, 田中博, “超音波センサを用いた広域屋内測位システムの構成と検証実験”, *測位航法学会論文誌*, Vol. 3, No. 1, pp. 1–8, 2012.
- [41] 青島伸治, 五十嵐寿一, “M-系列の相関を用いた音響測定”, *日本音響学会誌*, Vol. 24, No. 4, pp. 197–206, 1968.
- [42] 青島伸治, “M 系列変調相関法とその応用”, *計測と制御*, Vol. 16, No. 5, pp. 419–426, 1977.
- [43] Naoto Wakatsuki, Shin Kinjo, Jun Takarada, and Koichi Mizutani, “Precise wireless triggering system for anemometers with long-baseline acoustic probes”, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 49, No. 7, p. 07HC14, 2010.
- [44] Hirokazu Iwaya, , Koichi Mizutani, Tadashi Ebihara, and Naoto Wakatsuki, “Acoustical positioning method using transponders without clock synchronization”, In *The 37th Symp. Ultrasonic Electronics. 2P-2-5*, 2016.
- [45] Hirokazu Iwaya, Koichi Mizutani, Tadashi Ebihara, and Naoto Wakatsuki, “Acoustical positioning method using transponders with adaptive signal level normalizer”, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 56, No. 7S1, p. 07JC07, 2017.

- [46] Shinnosuke Hirata, Lalita Haritaipan, Kotaro Hoshihara, Hiroyuki Hachiya, and Nobuo Niimi, “Non-contact measurement of propagation speed in tissue-mimicking phantom using pass-through airborne ultrasound”, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 53, No. 7S, p. 07KC17, 2014.
- [47] Kota Yamanaka, Shinnosuke Hirata, and Hiroyuki Hachiya, “Evaluation of correlation property of linear-frequency-modulated signals coded by maximum-length sequences”, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 55, No. 7S1, p. 07KC09, 2016.
- [48] H. Hashizume, A. Kaneko, Y. Sugano, K. Yatani, and M. Sugimoto, “Fast and accurate positioning technique using ultrasonic phase accordance method”, In *TENCON 2005 - 2005 IEEE Region 10 Conference*, pp. 1–6, 2005.
- [49] “屋内測位ソリューション「iField indoor」とは?”
https://biz.biglobe.ne.jp/bl/ifield_indoor.html, (accessed 2019.10.30).
- [50] Hirokazu Iwaya, , Koichi Mizutani, Tadashi Ebihara, and Naoto Wakatsuki, “Indoor experiment of acoustical positioning method using transponders”, In *The 38th Symp. Ultrasonic Electronics. 2P-2-5*, 2017.
- [51] Hirokazu Iwaya, Koichi Mizutani, Tadashi Ebihara, and Naoto Wakatsuki, “Experimental investigation of the effect of signal reflection and coverage area on indoor acoustical positioning using transponders with adaptive signal level normalizer”, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 57, No. 7S1, p. 07LC03, 2018.
- [52] Hirokazu Iwaya, Satoki Ogiso, Koichi Mizutani, Tadashi Ebihara, and Naoto Wakatsuki, “Effect of movement on positioning accuracy in a transponder-based acoustical positioning”, *Journal of Physics: Conference Series*, 1075, 1, 012025,, Vol. 1075, No. 1, p. 012025, 2018.
- [53] Hirokazu Iwaya, , Koichi Mizutani, Tadashi Ebihara, and Naoto Wakatsuki, “Ranging experiment of moving object using acoustical transponder and doppler shifted reference signal”, In *The 40th Symp. Ultrasonic Electronics*,, 2019.

著者論文

査読付き雑誌論文

- [J-1] Hirokazu Iwaya, Koichi Mizutani, Tadashi Ebihara, and Naoto Wakatsuki, “Acoustical positioning method using transponders with adaptive signal level normalizer”, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 56, No. 7S1, p. 07JC07, 2017.
- [J-2] Hirokazu Iwaya, Koichi Mizutani, Tadashi Ebihara, and Naoto Wakatsuki, “Experimental investigation of the effect of signal reflection and coverage area on indoor acoustical positioning using transponders with adaptive signal level normalizer”, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 57, No. 7S1, p. 07LC03, 2018.

査読付き国際会議論文

- [P-1] Hirokazu Iwaya, Koichi Mizutani, Tadashi Ebihara, and Naoto Wakatsuki, “Effect of Movement on Positioning Accuracy in a Transponder-based Acoustical Positioning,” *Journal of Physics: Conference Series*, 1075, 1, 012025, 2018.

査読無し国内会議論文

- [D-1] 岩谷洋和, 水谷孝一, 若槻尚斗, 海老原格, “屋内における小規模な音響測位システムの設計,” 日本音響学会 2016 年春季研究発表会講演論文集, 1-Q-3, pp.1283-1284 2016.
- [D-2] 岩谷洋和, 水谷孝一, 海老原格, 若槻尚斗, “可聴域信号と音響トランスポンダを用いる測距実験,” 日本音響学会 2016 年秋季研究発表会講演論文集, 1-Q-3, pp.1013-1014, 2016.
- [D-3] Hirokazu Iwaya, Koichi Mizutani, Tadashi Ebihara, and Naoto Wakatsuki, “Acoustical positioning method using transponders without clock synchronization,” The 37th Symp. Ultrasonic Electronics. 2P-2-5, 2016.
- [D-4] Hirokazu Iwaya, Koichi Mizutani, Tadashi Ebihara, and Naoto Wakatsuki, “Indoor experiment of acoustical positioning method using transponders,” The 38th Symp. Ultrasonic Electronics. 2P-2-5, 2017.
- [D-5] Hirokazu Iwaya, Koichi Mizutani, Tadashi Ebihara, and Naoto Wakatsuki, “Indoor Positioning in Large-scale Area using Multiple Acoustical Transponder Units,” The 39th Symp. Ultrasonic Electronics, 1P-2-10, 2018.
- [D-6] Hirokazu Iwaya, Koichi Mizutani, Tadashi Ebihara, and Naoto Wakatsuki, “Ranging Experiment of Moving Object Using Acoustical Transponder and Doppler Shifted Reference Signal,” The 40th Symp. Ultrasonic Electronics, 2019.