

マルチパスに対してロバストな
少素子マイクロフォンアレイを用いる
屋内測位法に関する研究

2020年 3月

小木曾 里樹

マルチパスに対してロバストな
少素子マイクロフォンアレイを用いる
屋内測位法に関する研究

小木曾 里樹

システム情報工学研究科

筑波大学

2020年 3月

概 要

本研究は少素子のマイクロホンアレイと非同期の音響ビーコンを用いるマルチパスにロバストな屋内測位法の確立を目的とした。

第1章では測位法の歴史とこれまでに提案されている測位法について概説した。測位の方法と利用例について述べた後、屋内測位はマルチパスや見通し外による信号の変化が課題であることを述べた。屋内測位法について具体的な例とその課題を示し、高精度測位には時間情報の計測が必要であること、これを比較的容易に達成できる測位法に音響測位があることを示した。この上で、音響測位には到来時間、到来時間差、到来方向の3種類があり、前者の2種類は時刻同期が必要で機材が複雑になりやすいことを述べた。また、到来方向を用いる場合は時刻同期が不要だがマルチパスによる影響で測位精度が低いこと、受信機に多数のマイクロフォンが必要であり煩雑になることが課題であり、これらを解決できれば簡便でロバストな測位が可能であることを述べた。

第2章では非同期の音響ビーコンと少素子のマイクロフォンアレイを用いて測位を行う原理を示し、その有効性を実験により確認した。提案法では分離可能な音源を複数配置し、これに対して4素子から成るマイクロフォンアレイと車輪回転数を用いて測位を行う。この際、マルチパス等による音源方向の不正確さを、マイクロフォンアレイ素子間の幾何学的関係から評価する手法を提案した。音響ビーコンは周波数帯域幅 2 kHz のアップチャープ信号とし、6 m 四方の空間の四隅に配置した。測位対象となる移動ロボットでは、移動時の車輪回転数を計測するとともに、これらの音を4素子のマイクロフォンアレイを用いて受信した。その結果、車輪回転数のみを用いる手法では y 軸が最も大きく平均 0.67 m、標準偏差 1.5 m 程度の測位誤差が発生するのに対し、提案手法では平均 0.069 m、標準偏差 0.2 m 程度の誤差で測位が可能であった。音の遮蔽がある場合、音源方向の誤差が生じたものの、これに対応する不正確さの評価値が大きくなり、測位への影響を抑えることを確認した。ただし、マルチパスによる音源方向の誤検出はマイクロフォンアレイの幾何学的関係からは検出できず、他の手法が必要であることを示唆した。以上により、非同期の音響ビーコンと少素子のマイクロフォンアレイを用いる測位の原理と測位が可能

であることを示した。

第3章では非同期音響ビーコンの配置及び信号設計を行った。音響ビーコンの配置及び受信機の位置関係により、同じ音源方向誤差から生じる測位結果の誤差は変化する。この関係を定量化するため、音響ビーコン及び受信機の幾何学的関係の条件数を定義した。条件数の評価はシミュレーションによって行い、一定の音源位置の誤差、音源方向の誤差を与えた場合の測位誤差について条件数との比較を行った。その結果、測位誤差と条件数はよく対応しており、これによって音源配置の評価が可能であることを示した。次に、音源方向を用いる測位でビーコンから発する信号について、擬似乱数系列を用いる場合の設計パラメータによる音源方向推定および測位への影響を検討した。シミュレーションでは測位に最小限必要である3機の音響ビーコンを設置し、その周辺を移動ロボットで走行させた。このとき音響ビーコンが発する信号について、変調のキャリア周波数、チップレート及びM系列信号の次数を変化させた。その結果、M系列符号を用いる場合、チップレートとキャリア周波数が音源方向推定に影響を与え、これらを適切に設定することで測位が可能であることを示した。また、擬似乱数系列を用いる場合、ドップラシフトが生じると送受信信号間の相関がなくなり検出が難しくなる。移動ロボット程度の測位が可能であるかを検討するため、音源方向推定のためのマイクロフォン間伝搬時間推定を対象として異なる変調のパラメータにおけるドップラシフトの影響を検討し、相互相関関数を用いる伝搬時間の正確さの評価指標を提案した。その結果、相互相関関数の最大値対実効値比を用いて伝搬時間の不正確さを評価できること、チップレートとキャリア周波数を適切に設定することで2 m/s以上の速度でも伝搬時間計測が可能であることを示した。

第4章ではマイクロフォン間の相互相関関数を位置の尤度として用いる測位法を提案した。非同期の音響ビーコンと2素子のマイクロフォンアレイを用いる測位手法について、その測位精度を4素子のマイクロフォンアレイを用いる測位と比較し考察した。その結果、提案手法はマイクロフォン間の相互相関関数を状態変数に応じ参照して尤度計算を行い、音源方向が一意に定まらない場合でも測位可能であることを示した。また、強い反射波のある環境、及び音響ビーコンが遮蔽された場合においても、従来法に比べ測位誤差に対する影響が少なくロバストな測位が可能であることを示した。以上より、本研究では少素子のマイクロホンアレイと非同期の音響ビーコンを用いるマルチパスにロバストな屋内測位法を確立した。本研究の成果は少素子のマイクロフォンでロバストな測位を可能とするものであり、将来的にスマートフォンや小型機器等へ適用可能な簡便な屋内測位法として貢献するものである。

目 次

第1章	序 論	1
1.1	屋内外の位置推定手法の背景	1
1.2	屋内測位の現状と提案されている手法	2
1.3	音響測位の原理と課題	3
1.4	本研究の目的と論文構成	5
第2章	非同期音響ビーコンの音源方向を用いる屋内測位手法	7
2.1	はじめに	7
2.2	マイクロフォンアレイと非同期音響ビーコンを用いる測位の原理	7
2.2.1	マイクロフォンアレイを用いる音源方向推定とその信頼度評価法	7
2.2.2	車輪回転数と音源方向を用いる拡張カルマンフィルタ	10
2.3	実験	12
2.4	結果・考察	15
2.4.1	遮蔽物や壁面のない場合	15
2.4.2	遮蔽物がある場合	16
2.4.3	壁面による音のマルチパスがある場合	17
2.5	まとめ	19
第3章	非同期音響ビーコンの配置及び信号設計	23
3.1	はじめに	23
3.2	音響ビーコンの配置による測位精度予測指標	23
3.3	擬似乱数系列を用いる場合のパラメータによる測位への影響	25
3.3.1	音響ビーコンのパラメータによる音源方向推定への影響評価シミュレーション	27
3.4	擬似乱数系列を用いる場合のパラメータによるドップラシフトの影響	30
3.4.1	シミュレーション条件	31

3.4.2	結果と考察	33
3.5	まとめ	35
第4章	少素子マイクロフォンの相互相関関数を尤度として用いるロバスト測位法	37
4.1	はじめに	37
4.2	相互相関関数を尤度として用いる測位の原理	37
4.2.1	マイクロフォン間の相互相関関数とマイクロフォン位置の関係	37
4.2.2	相互相関関数を用いるマルチパスにロバストな位置尤度の定義	39
4.2.3	パーティクルフィルタを用いる測位法	41
4.3	実験	42
4.3.1	マイクロフォンアレイと移動ロボットを用いる測位評価	42
4.3.2	実験環境における壁面の有無によるマルチパス	44
4.4	結果・考察	44
4.4.1	遮蔽物や壁面のない場合	44
4.4.2	遮蔽物がある場合	47
4.4.3	壁面による音のマルチパスがある場合	48
4.5	提案法の測位誤差と計算時間の関係	49
4.6	まとめ	51
第5章	結 論	53
	謝 辞	57
	著者文献	67
	本論文の著作権について	71

目 次

1.1	Overview of different acoustic positioning methods.(a) TOA-based method, (b) TDOA-based method, (c) DOA-based method.	4
1.2	Structure of this dissertation.	6
2.1	Block diagram of an acoustic beacon and microphone array signals.	8
2.2	Outline of the microphone array and far-field sound source.	9
2.3	Coordinate system used in this chapter.	10
2.4	Overview of the proposed method using DOA estimation and extended Kalman filter.	12
2.5	Sound sources layout and the trajectory of the robot for experiment.	13
2.6	DOA error and $\Delta\tau_k$ of sound 1 in experiment 1.	16
2.7	An example of self-localization result in experiment 1.	17
2.8	DOA error and $\Delta\tau_k$ of sound 1 in experiment 2.	18
2.9	An example of self-localization result in experiment 2.	19
2.10	An example of self-localization result in experiment 3.	20
2.11	DOA error and $\Delta\tau_k$ of sound 1 in experiment 3.	21
3.1	Variables used in the self-localization methods.	24
3.2	Numerical experiment condition.	24
3.3	Results of self-localization numerical experiments. (a) self-localization only using odometry of wheel rotation, (b) self-localization using DOAs of landmarks (assuming no noise exist), (c) self-localization using DOAs of landmarks (assuming Gaussian white noise was included), (d) self localization using DOAs of landmarks (assuming sound location error).	25
3.4	Reciprocal conditional number distribution and sound source layouts, (a) 3 sound sources, (b) 4 sound sources, (c) 5 sound sources	26

3.5	Location and heading direction of mobile robot in absolute coordinate system $x - y$. ©2016 IEEE.	26
3.6	Geometrical condition of simulation. ©2016 IEEE.	28
3.7	Parameters vs. DOA estimation error. (a) baud rate f_b vs. DOA error ($f_c = 10$ kHz, $p = 10$). (b) carrier frequency f_c vs. DOA error ($f_b = 10$ kHz, $p = 10$). (c) Order of M sequence p vs. DOA error ($f_c = 10$ kHz, $f_b = 10$ kHz). ©2016 IEEE.	29
3.8	Result of localization. $f_c = 10$ kHz, $f_b = 10$ kHz, $p = 10$. ©2016 IEEE.	29
3.9	Localization error vs. travel distance of mobile robot ($f_b = 10$ kHz, $f_c = 10$ kHz, $p = 10$). ©2016 IEEE.	30
3.10	Simulation condition and description of TDOA estimation method	31
3.11	Definition of variable used for calculation of PAPR	33
3.12	Velocity v vs. error of time difference of arrival $\Delta\bar{\tau}$ and velocity v vs. PAPR p for different f_c and f_b . Shaded areas represent inaccurate TDOA.	34
3.13	Normalized cross correlation functions $f_{i,k}$ of Kasami sequence for each highlighted points in Fig. 3.12. (a) P1, $f_c = 40$ kHz, $f_b = 5$ kHz, $v = -1$ m/s, (b) P2, same condition to (a), $v = 0$ m/s.	34
4.1	Coordinate system used in the proposed method.	38
4.2	Overview of the proposed likelihood.	39
4.3	Overview of the proposed method using particle filter.	40
4.4	Experimental setup of each condition.	43
4.5	Experimental condition of reverberation and reflection. (a) Energy decay curve without the wall, (b) energy decay curve with the wall, (c) close-up of the impulse response without the wall, (d) close-up of the impulse response with the wall.	45

4.6	An example of the localization result of each method in experiment 1. (a) Localization results for each method. (b) An example of the location likelihood $p(\mathbf{x}_i(t) \mathbf{R})$ at the point s. Panel (c) shows the location likelihood at the point s only with the beacon #1 $p(\mathbf{x}_i(t) R_1^1)p(\mathbf{x}_i(t) R_2^1)$, (d) shows that with the beacon #2 $p(\mathbf{x}_i(t) R_1^2)p(\mathbf{x}_i(t) R_2^2)$, (e) shows that With the beacon #3 $p(\mathbf{x}_i(t) R_1^3)p(\mathbf{x}_i(t) R_2^3)$, and (f) shows that with the beacon #4 $p(\mathbf{x}_i(t) R_1^4)p(\mathbf{x}_i(t) R_2^4)$.	45
4.7	Localization error of experiment 1. (a) Box plot of the localization error. (b) Cumulative distribution functions of the localization error.	46
4.8	An example of the localization result of each method in experiment 2. (a) Localization results for each method. (b) An example of the location likelihood $p(\mathbf{x}_i(t) \mathbf{R})$ at the point s. Panel (c) shows the location likelihood at the point s only with the beacon #1 $p(\mathbf{x}_i(t) R_1^1)p(\mathbf{x}_i(t) R_2^1)$, (d) shows that with the beacon #2 $p(\mathbf{x}_i(t) R_1^2)p(\mathbf{x}_i(t) R_2^2)$, (e) shows that With the beacon #3 $p(\mathbf{x}_i(t) R_1^3)p(\mathbf{x}_i(t) R_2^3)$, and (f) shows that with the beacon #4 $p(\mathbf{x}_i(t) R_1^4)p(\mathbf{x}_i(t) R_2^4)$.	47
4.9	Localization error of experiment 2. (a) Box plot of the localization error. (b) Cumulative distribution functions of the localization error.	47
4.10	An example of the localization result of each method in experiment 3. (a) Localization results for each method. (b) An example of the location likelihood $p(\mathbf{x}_i(t) \mathbf{R})$ at the point s. Panel (c) shows the location likelihood at the point s only with the beacon #1 $p(\mathbf{x}_i(t) R_1^1)p(\mathbf{x}_i(t) R_2^1)$, (d) shows that with the beacon #2 $p(\mathbf{x}_i(t) R_1^2)p(\mathbf{x}_i(t) R_2^2)$, (e) shows that With the beacon #3 $p(\mathbf{x}_i(t) R_1^3)p(\mathbf{x}_i(t) R_2^3)$, and (f) shows that with the beacon #4 $p(\mathbf{x}_i(t) R_1^4)p(\mathbf{x}_i(t) R_2^4)$.	48
4.11	Localization error of experiment 3. (a) Box plot of the localization error. (b) Cumulative distribution functions of the localization error.	49
4.12	Calculation time and localization error for different numbers of particles with two microphones. (a) Relationship between calculation time and number of particles. Panels (b), (c) and (d) depict the relationship between the localization error and number of particles in experiment 1, 2 and 3, respectively.	50

4.13 Calculation time and localization error for different numbers of particles with two microphones. (a) Relationship between calculation time and number of particles. Panels (b), (c) and (d) depict the relationship between the localization error and number of particles in experiment 1, 2 and 3, respectively.

表 目 次

2.1	Localization error of experiment 1(lower is better)	15
2.2	Localization error of experiment 2(lower is better)	17
2.3	Localization error of experiment 3(lower is better)	19
3.1	Condition of simulations. ©2016 IEEE.	28
3.2	Generating polynomials used in simulation	29
3.3	Common parameters of simulation	32
4.1	Condition of experiments.	43

第1章 序 論

1.1 屋内外の位置推定手法の背景

位置情報を計測する測位法は古くから社会の発展に貢献してきた。古代より行われてきた天文学的方法による測位を発展させ、電波を発する基地局を設置し、これによって測位を行う手法が提案された。古くはイギリスで開発された Gee 及び米国で実用化された LORAN(long-range navigation system) に端を発する。いずれも複数の基地局から電波を発しその到来時間差を受信端末で計測、これを用いて基地局を焦点とする双曲線を求め、測位を行う。測位精度は 2Drms 値で 250 m 程度とされ、主に航海や航空機の誘導に用いられた。その後、Transit や Parus, Tsikada 等により人工衛星を用いる測位の可能性が示され [1], GPS(Global Positioning System) が 1995 年に使用開始された [2]。GPS では衛星及び地上局を含めたシステムにより、位置・時刻・速度を計測する手法を与えた。GPS が民生用に開放されて以降、屋外における位置情報はカーナビゲーション、スマートフォンのナビゲーションから、ネットワーク機器の時刻同期に至るまで社会的なインフラとして用いられている。これに続くように、各国が独自の GNSS(Global Navigation Satellite System) の開発・運用を開始しており、現在では GALLILEO (欧州連合), GLONASS (ロシア), BeiDou (中国), NAVIC (インド), QZSS (日本) が運用されている。これら信号の利用方法により、RTK(Real Time Kinematics)-GPS などの派生も生まれ、屋外ではセンチメートルオーダの測位が可能となった。

屋外での測位が可能となった現在、屋内の測位が求められている。近年の大型商業施設や地下空間の拡大や工場の効率化、アクセシビリティ向上の要求に伴い、ナビゲーションや位置計測等が必要とされつつも GNSS による測位が不可能な空間が多く生じている。国内では国土交通省などを主体として測位関連のプロジェクトがあり、地理空間情報活用推進基本計画を皮切りに、高精度測位社会プロジェクトなどが実施される活発な分野である。特に後者では、歩行者に適用可能な測位法は 2012 年に 10 m 程度であった測位精度が、2018 年には 2 m 程度まで向上した。

このような測位技術の発展は多数の応用を生み出している。たとえば歩行者向けには日

本橋室町地区における視覚障害者・車椅子利用者を含めたインクルーシブ・ナビ [3], 成田空港における旅行者向けナビアプリケーション NariNAVI などへと応用されている [4]. 事業者向けには工場やレストラン等の効率化のための動線把握やこれに基づく業務改善 [5,6], 顧客の移動経路の収集 [7,8] や高齢者の見守り [9,10] などが行われている. さらに高い精度かつ簡便に利用可能な屋内測位法が確立されれば, これら屋内システムの性能向上やさらなるアプリケーションへの適用が可能となる.

1.2 屋内測位の現状と提案されている手法

屋内におけるセンチメートル級の測位は現在も未解決の課題である. 屋内測位の難しさは主に, 建物の構造により測位信号が影響を受けることにある. 測位に用いる信号は屋内では複雑なパスを經由して受信され, 場合によっては測位端末とビーコンが見通し外 (Non-line-of-sight:NLOS) となり信号が想定通りに受信されない [11-13]. このような屋内測位を達成するための測位法は, 環境中に設置するビーコンの有無により二種類に分けられる. ビーコンを用いない測位法の代表的な例は Light Detection and Ranging(LiDAR) による計測値, もしくはカメラによる計測値を用いる測位法である [14,15]. これら測位法はセンチメートル程度の測位精度を達成可能だが, たとえば同一形状の部屋の識別など, これらセンサで得られる情報が同じ場合には絶対位置の測位ができない. また, 壁や床, 人などでセンサの視界が覆われた場合には測位が不可能である.

測位対象の移動を直接計測するため, 慣性計測装置 (Inertial Measurement Unit : IMU) を用いる測位法がある. この方法では測位対象の加速度・角速度を積分する [16], もしくはこれらから歩行者の歩数と歩幅を推定し積算することで測位を行う [17]. IMU を対象に取り付けるだけで測位が可能であり簡便である一方, センサの誤差を時間とともに積算し, これを修正するすべがないことから時間とともに測位精度が悪くなる.

ビーコンを用いる測位法では, 位置が既知かつ既知の信号を発するビーコンを用いて測位を行う. もっとも簡便に使用可能な測位法として Bluetooth Low Energy (BLE) ビーコン, Wi-Fi ルータもしくはRFID(Radio Frequency Identifier) タグを設置し [18], これらが発する電波の受信強度 (Received Signal Strength : RSS) を計測する測位法がある. この方法では測位環境について, 事前に他の測位法等により計測した位置が既知の地点での電波強度地図を作成する [19]. このように作成した電波強度地図はフィンガープリントと呼ばれ, 測位は計測を行った電波強度とフィンガプリントの一致する位置を測位結果とする [20]. フィンガプリントを用いる測位は簡便な装置で可能な一方で, 電波強度その

ものが人の動きや環境の変化によって大きく変動することから測位精度の向上が難しい。たとえば歩行者の測位を目的とした加速度・角速度の情報を統合した測位法でも測位精度が2 m程度が限界である [3]。これまでに多数の試みがあるものの、いまだ1 m以下の精度を達成する測位はできていない [21–23]。

光通信を用いる測位法では、天井に設置した照明などを点滅させ、これによって位置情報を計測する [24]。スマートフォンに搭載されたカメラでも測位が可能であると示されている。しかしながら、受信端末のカメラで常に光源を捉える必要があり姿勢に制約があること、照明を用いるため人間に知覚されるフリッカを生じないように測位信号を重畳すると精度を向上しづらいなどの課題がある [25, 26]。

高精度な測位は振幅情報ではなく、位相もしくは時間情報を計測するのが一般的である [27]。電波を用いる測位では、Ultra-Wide Band(UWB)と呼ばれる超広帯域の信号を発生し、その伝播時間を計測する手法が用いられる [28–31]。このうち特に Impulse-Radio UWB (IR-UWB) と呼ばれる種類の信号ではインパルス様の信号を発生することで、送受信感でその伝播時間を計測する。UWB を用いることでセンチメートル程度の測位が可能であることは示されているものの [32]、特殊な送受信機を必要とすることから国内で制度化されて以来も普及していない。

1.3 音響測位の原理と課題

これまでに示したように、屋内における高精度測位には時間情報の計測が必要とされている。このような背景の中で、音を用いて測位を行う音響測位が注目を集めている。電波を用いる測位に比べ、音を用いる場合には音速(約 3×10^2 m/s)が光速(3×10^8 m/s)にくらべ非常に遅いことから、伝搬時間を比較的容易に計測可能である [33]。音響測位では既知の位置に設置した音響ビーコンと呼ばれる音源から音を発生し、音の到来時間を用いることで測位を行う。

音響測位は計測する伝搬時間の種類により、伝搬時間 (Time-of-arrival: TOA)、伝搬時間差 (Time-difference-of-arrival: TDOA)、音源方向 (Direction-of-arrival: DOA) のうちいずれかを用いる。主な原理の概要を Fig.1.1 に示す。TOA を用いる測位法はこれらの中で最も高精度を達成している測位法である。この手法では TOA、もしくは Time-of-flight(TOF) と呼ばれる音響ビーコンと受信機間の時間差を計測し、これに基づいて測位を行う [34, 35]。TOA を用いる測位法は高精度を達成しやすい一方、ビーコンと受信機すべての時刻同期が必須であり、何らかの特殊なハードウェアが必要である [36]。より簡便な測位法を実現

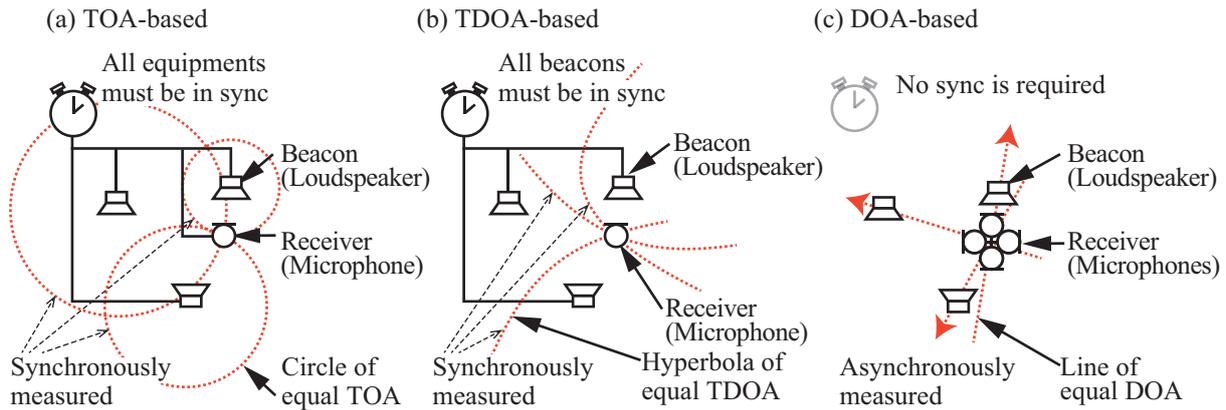


Fig. 1.1: Overview of different acoustic positioning methods.(a) TOA-based method, (b) TDOA-based method, (c) DOA-based method.

するため時刻同期を不要とする試みがあるものの、同時に測位可能な受信機は1機のみであるなど制約がある [37]。TDOA を用いる測位法はビーコン間の音の到来時間の差を計測したうえで、ビーコンを焦点とする伝搬時間差に対応する双曲線の交点を求めることで測位を行う [38–40]。このため、TDOA を用いる測位法ではビーコン間の時刻同期のみを必要とし、受信機は時刻同期が不要である [41–43]。しかしながら、大規模な施設などではすべてのビーコンの時刻同期は困難であるという課題がある。ビーコンや受信機間の時刻同期が全く不要な測位法として、DOA を用いる測位法が提案されている。DOA を用いる測位はビーコンが発した音の方向を受信機で計測し、これらと音源位置を用いて測位を行う [44]。音の方向推定は複数のマイクロフォンの信号を用いて推定するのが一般的である。このマイクロフォンアレイの設置方法により、マイクロフォンを環境中に設置するか、測位対象に搭載するかの2種類がある。いずれの場合についても、DOA 推定はマイクロフォンの受信信号間の相互相関関数を求め、これが最大値となる時刻に基づいて行われる [45]。このとき、相互相関関数は反射等に対しても高い相関を示すことになり、本来の音源方向以外の方向に最大値をもつ場合がある [44,46,47]。音源方向の誤差は音源と受信機の距離に応じて拡大され、TOA や TDOA に比べて大きな測位誤差を生じやすい [48]。このため、DOA を用いる測位法はマルチパスによる信号の変化に対するロバスト性が他の手法に比べ劣る。DOA を用いる測位でもマルチパスにロバストな測位が可能となれば、ビーコン・受信機の時刻同期が一切不要な測位が可能であり、特に大規模空間等での測位に貢献できる。

また、DOA を用いる測位の欠点として、受信機が多数のマイクロフォンから成り複雑になることが挙げられる。たとえば、移動ロボットを対象とする研究では32チャンネルの

球場マイクロフォンアレイ [49] や 32 チャンネルの平面マイクロフォンアレイなどが用いられる。環境中にマイクロフォンアレイを設置する場合はシステム全体では数十のマイクロフォンを用いることになる [30, 50]。マイクロフォン素子数が少ない場合、高度な音源分離や反射抑制の処理ができず、音源方向が不正確になりやすい。また、2次元の平面を測位対象とする場合、音源方向を一意に定めるには少なくとも3素子のマイクロフォンが必要である。このため、マイクロフォンの数が2素子という最小構成のマイクロフォンアレイでは DOA を一意に計測できず測位が不可能であった。

このような音響測位の困難さを克服するため、他のセンサ情報と統合して測位を行う試みが提案されている。マイクロフォンの移動と組み合わせる手法も提案されているが [51], MUSIC(Multiple Signal Classification) 法による音源方向推定を行っており [52], 音源数よりもマイクロフォン数が多く必要という制約がある。2素子からなる最小構成のマイクロフォンアレイを含む少素子マイクロフォンアレイでも実現可能な測位法を確立すれば、小型の移動端末や小型センサなど、多くの分野に貢献できる。

1.4 本研究の目的と論文構成

本研究は非同期の音響ビーコンと少素子のマイクロホンを用いてマルチパスにロバストな屋内測位を可能とすることを目的とする。時間経過を積算することで微分値は正しいオドメトリと分散は大きい絶対測位が可能な音響測位を組み合わせることで、分散の小さい音響測位を実現できる可能性がある。音源方向を一意に定めないことによる曖昧さを多数の音源の配置、及びマイクロフォンアレイの移動を考慮することで、DOAの問題点であるばらつきの大きさやマルチパスに対するロバスト性、多数のマイクロフォンが必要であるという課題を解決する。本論文の構成は以下の通りである。第1章は序論として屋内測位の背景と音響測位の原理について述べ、その問題点を指摘した。第2章ではマイクロフォンアレイを搭載した移動ロボットを用いて、非同期の音源でも測位が可能な原理を示しその有用性を実験により示す。第3章では非同期音源を用いる音響測位について、音響ビーコンの配置を評価する指標、ならびに信号の評価指標を提案し、これらについてシミュレーションによりその有用性を確認する。第4章では非同期音源を用いた上でマルチパスにロバストな測位を実現する原理を提案し、実験によりロバスト性ならびに計算量を示す。前節で述べたマルチパスによる音源方向推定の誤差やマイクロフォン素子数の課題は音源方向を一意に定めようとするところにあると考え、これらを解決する測位法を提案する。第5章は結論である。Figure 1.2 に本論文の構成を示す。

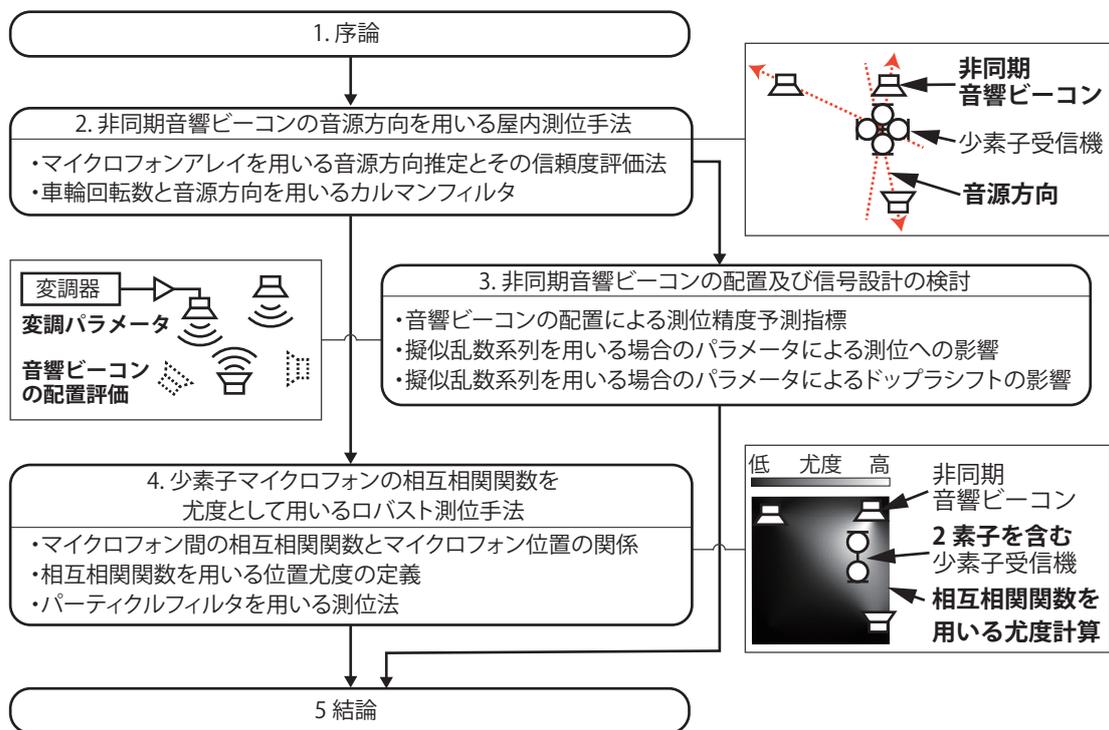


Fig. 1.2: Structure of this dissertation.

第2章 非同期音響ビーコンの音源方向を用いる屋内測位手法

2.1 はじめに

これまでに大規模なマイクロフォンアレイをロボットに搭載し、音源位置を推定する手法などが提案されているが、これらは未知の会話などを前提としており、多くのマイクロフォンが必要となる [53]. これに対し少素子のマイクロフォンを用いる場合、高度な音源分離やマルチパスの抑制が困難であり、マイクロフォンアレイを用いる音源方向検出結果が不正確になる場合がある. 本章では4素子からなる少素子のマイクロフォンと非同期の音響ビーコンを用いる測位法を提案する [44]. 提案法はマイクロフォンと車輪回転数のみを用いる測位を拡張カルマンフィルタにより統合することで、互いの弱点を補い測位精度を向上する.

2.2 マイクロフォンアレイと非同期音響ビーコンを用いる測位の原理

2.2.1 マイクロフォンアレイを用いる音源方向推定とその信頼度評価法

マイクロフォンアレイを複数用いることで、音源方向を計測することが可能である. 本節では提案法で用いる音源方向推定法を導出するとともに、これに基づく信頼度評価法を示す. 本研究で対象とする音響ビーコン及びマイクロフォンアレイを用いる音源方向推定のブロック線図を Fig. 2.1 に示す.

移動ロボットの進行方向に対する音源 k の角度を θ_k とする. 音源方向 θ_k を推定するため、移動ロボットに搭載したマイクロフォンアレイ素子間の時間差を用いることを考える. 音源 k から発せられた音 $s_k(t)$ がマイクロフォン i, j で時間差 $\tau_{i,k}, \tau_{j,k}$ をもって受信されると仮定する. これらマイクロフォンで受信される音を $m_{i,k}, m_{j,k}$ とすると、これらは

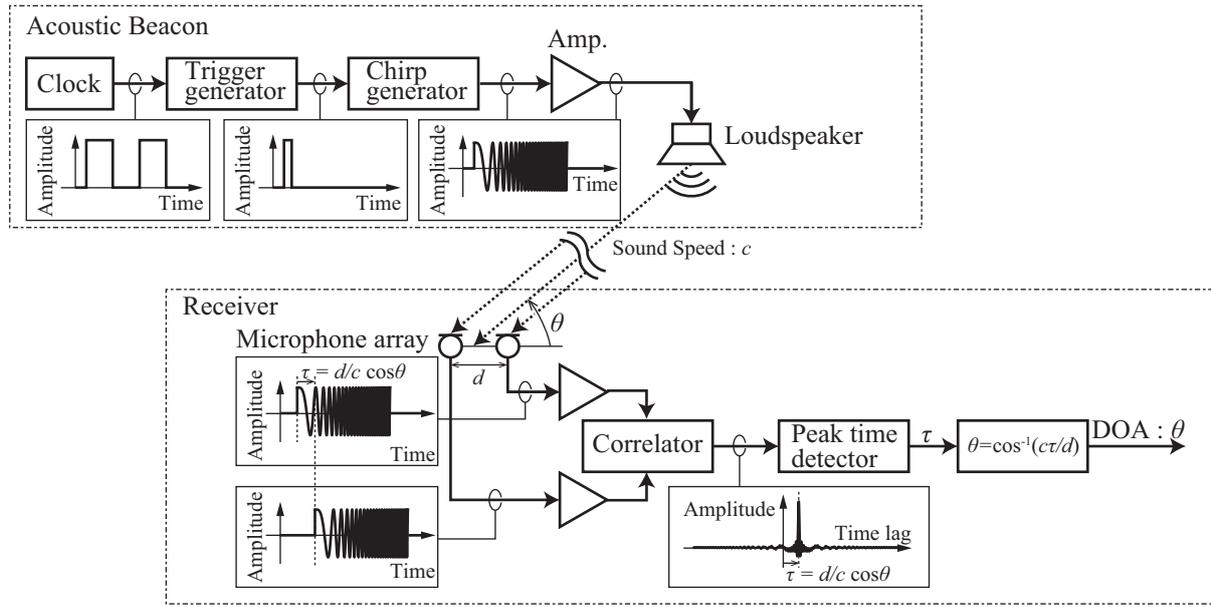


Fig. 2.1: Block diagram of an acoustic beacon and microphone array signals.

次式で表される.

$$m_{i,k}(t) = s_k(t + \tau_{i,k}), \quad (2.1)$$

$$m_{j,k}(t) = s_k(t + \tau_{j,k}), \quad (2.2)$$

ある時間窓 w を仮定するとき, これら信号の相互相関関数 $f_{ij,k}(t)$ は次式の通り計算できる.

$$f_{ij,k}(t) = \int_{t-w}^t m_{i,k}(\tau) m_{j,k}(\tau - t) d\tau. \quad (2.3)$$

この関数の最大値は $m_{i,k}$ と $m_{j,k}$ が最も相関をもつ時刻を表しており, 理想的には $\tau_{ij,k} \equiv |\tau_{i,k} - \tau_{j,k}|$ となる時刻である. このような事実をもとに, 音源 k に関するマイクロフォン i, j 間の到来時間差は次式で求められる.

$$\tau_{ij,k} = \arg_t \max(f_{ij,k}(t)). \quad (2.4)$$

つぎに, 以上により求めた到来時間差から θ_k を求める. 本研究では 図 2.3 に示すマイクロフォンアレイを用いると仮定する. 4素子のマイクロフォンのうち, 対向する2素子の組についてそれぞれ到来時間差 $\tau_{12,k}, \tau_{34,k}$ を計算する. マイクロフォンが音源 k から十分に遠い場合, 到来する音は角度 θ_k から到来する平面波と近似できる. このとき, 到来

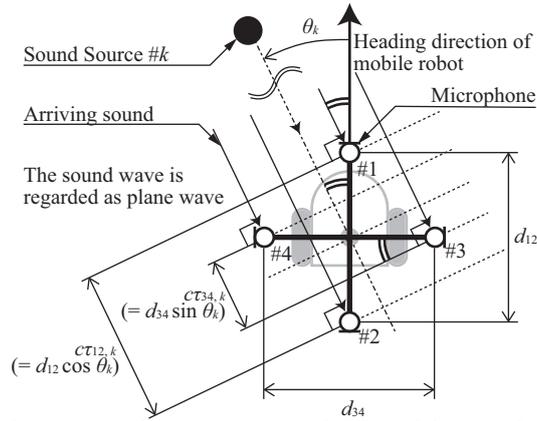


Fig. 2.2: Outline of the microphone array and far-field sound source.

時間差 $\tau_{12,k}$ とマイクロフォン間距離 d_{12} , 音源 k の音源方向 θ_k の関係は次式で表される.

$$c\tau_{12,k} = d_{12} \sin \theta_k, \quad (2.5)$$

ここで c は空気中の音速を表す. マイクロフォン 3, 4 についても同様にして到来時間差 $\tau_{34,k}$ とマイクロフォン間距離 d_{34} , 音源 k の音源方向 θ_k には次式が成り立つ.

$$c\tau_{34,k} = d_{34} \cos \theta_k. \quad (2.6)$$

これらの関係を次式の通り θ_k について解けば, 音源方向が求まる.

$$\theta_k = \text{atan2}\left(\frac{\tau_{12,k}}{d_{12}}, \frac{\tau_{34,k}}{d_{34}}\right). \quad (2.7)$$

ここで $\text{atan2}(x, y)$ は (x, y) の x 軸からの角度を $[-\pi, \pi]$ の範囲で表す関数とする. 以上の関係を用いて音源方向 θ_k を推定する.

実際の音源方向推定では, 屋内における音のマルチパス等の影響により, 音源方向が正しく推定できない場合がある. 本研究では上記マイクロフォンアレイの幾何学的な関係を用いて音源方向の正しさを評価する手法を提案する. マイクロフォンアレイは直交するように設置されていると仮定すると, これらマイクロフォンで得られた到来時間差が正しく得られた場合, 次式に示す $\Delta\tau_k$ は 0 となる.

$$\Delta\tau_k \equiv 1 - \sqrt{\left(\frac{c\tau_{12,k}}{d_{12}}\right)^2 + \left(\frac{c\tau_{34,k}}{d_{34}}\right)^2}. \quad (2.8)$$

この値が 0 より大きくなる場合には, 2 つマイクペアで計測した到来時間差に矛盾が生じ

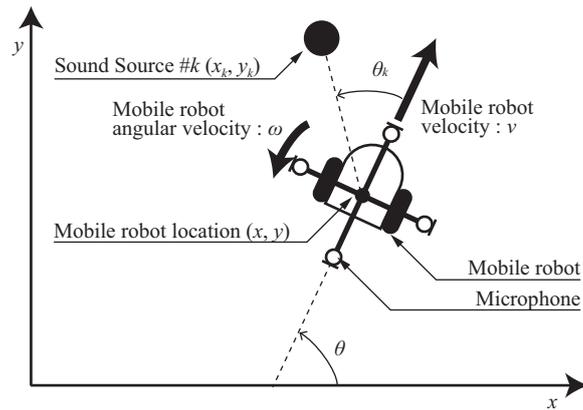


Fig. 2.3: Coordinate system used in this chapter.

ていることを表す。このことから、 $\Delta\tau_k$ を音源方向推定の正しさを表す指標として用いる。提案法では $|\Delta\tau_k|$ の値が音源方向の分散に比例すると仮定するとともに、しきい値を超えた場合には音源方向推定に失敗したと判断し直前に推定した音源方向によって測位を行うこととする。

2.2.2 車輪回転数と音源方向を用いる拡張カルマンフィルタ

前節で求めた音源方向と、車輪の回転数から自己位置を推定するオドメトリを統合するため、これまでに我々が提案している拡張カルマンフィルタによる測位手法を用いる [44].

Figure 2.3 に示すとおり、ロボットの x 座標, y 座標, 姿勢をそれぞれ x_r , y_r , θ_r とし, ロボットの並進速度を v , 角速度を ω とすれば, これらの時間発展は次式で表される。

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \mathbf{x} + \begin{bmatrix} v \cos \theta_r \\ v \sin \theta_r \\ \omega \end{bmatrix}, \quad (2.9)$$

$$\mathbf{x} = [x_r \ y_r \ \theta_r]^T. \quad (2.10)$$

アンカーとするすべての音源の位置は既知であるとすれば, ロボットの位置・姿勢 x_r , y_r ,

θ_r , 音源 k の位置 x_k, y_k と, 推定された各音源方向 θ_k は次式のような関係にある.

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \vdots \\ \theta_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tan^{-1}((y_1 - y_r)/(x_1 - x_r)) - \theta_r \\ \tan^{-1}((y_2 - y_r)/(x_2 - x_r)) - \theta_r \\ \vdots \\ \tan^{-1}((y_n - y_r)/(x_n - x_r)) - \theta_r \end{bmatrix}. \quad (2.11)$$

これらの式を用い, 式(2.9)を状態遷移を表す方程式, 式(2.11)を観測方程式と考え, 拡張カルマンフィルタ (EKF) を適用し, \mathbf{x} を推定することでロボットの位置・姿勢を推定する.

いま, 時刻 $t - \Delta t$ において推定した時刻 t における \mathbf{x} を $\hat{\mathbf{x}}_{t-\Delta t/t}$ とし, 時刻 t において推定した時刻 t , 時刻 $t + \Delta t$ における \mathbf{x} をそれぞれ, $\hat{\mathbf{x}}_{t/t}$, $\hat{\mathbf{x}}_{t/t+\Delta t}$ とする. また, これらの推定誤差の共分散行列を $\mathbf{P}_{t-\Delta t/t}$, $\mathbf{P}_{t/t}$, $\mathbf{P}_{t/t+\Delta t}$ とする. 式(2.11)の左辺を \mathbf{y} , 右辺を $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ と表すこととする. このとき, ロボットの自己位置推定のアルゴリズムは以下のように表すことができる.

$$\mathbf{K} = \mathbf{P}_{t-\Delta t/t} \mathbf{H}^T [\mathbf{H} \mathbf{P}_{t-\Delta t/t} \mathbf{H}^T + \mathbf{R}]^{-1} \quad (2.12)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{t/t} = \hat{\mathbf{x}}_{t-\Delta t/t} + \mathbf{K}(\mathbf{y} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}_{t-\Delta t/t})) \quad (2.13)$$

$$\mathbf{P}_{t/t} = \mathbf{P}_{t-\Delta t/t} - \mathbf{K} \mathbf{H} \mathbf{P}_{t-\Delta t/t} \quad (2.14)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{t/t+\Delta t} = \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}_{t/t}) \quad (2.15)$$

$$\mathbf{P}_{t/t+\Delta t} = \mathbf{F} \mathbf{P}_{t/t} \mathbf{F}^T + \mathbf{Q} \quad (2.16)$$

ここで \mathbf{R} は観測誤差の共分散行列, \mathbf{Q} はシステムノイズの共分散行列であり, それぞれ音源方向推定の誤差, ロボットの速度・角速度の観測ノイズを表す. \mathbf{F} , \mathbf{H} はそれぞれ次式で与えられるヤコビアンである.

$$\mathbf{F} = \left(\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \right)_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}_{t/t}}, \mathbf{H} = \left(\frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{x}} \right)_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}_{t/t}} \quad (2.17)$$

これらを1ステップとし, Δt 秒後に $t + \Delta t \rightarrow t$, $t \rightarrow t - \Delta t$ として式(2.12)~(2.16)を繰り返すことで, 位置・姿勢の推定値 $\hat{\mathbf{x}}_{t/t}$ を得る. このうち, 観測誤差の共分散行列には音源方向の正しさを表す $|\Delta \tau_k|$ を用いる.

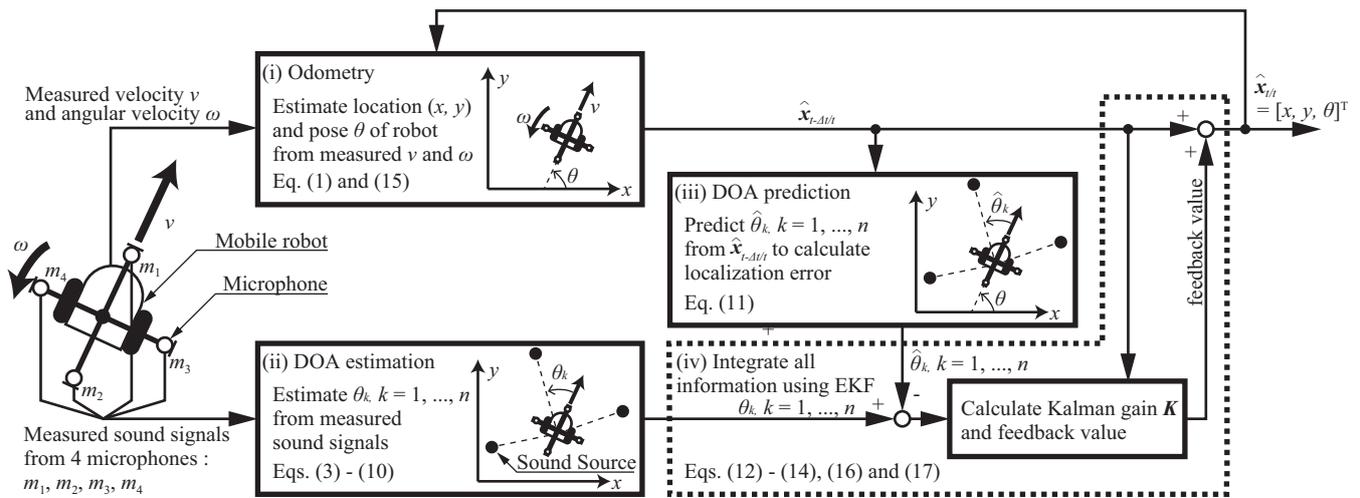


Fig. 2.4: Overview of the proposed method using DOA estimation and extended Kalman filter.

2.3 実験

実験では移動ロボット (iRobot Create, iRobot) を屋内で最大速度 0.25 m/s で動作させ、その測位精度を評価した。移動ロボットには 4 素子のマイクロフォンを半径 25 cm の円状に等間隔で配置した。マイクロフォンの信号は AD コンバータ (USB-6212, National Instruments) を使用し、サンプリング周波数 100 kHz で PC へ取得した。移動ロボットの車輪回転数は 5 Hz で計測を行ない、これに合わせて提案法の測位を行った。提案法による測位の精度を比較するため、車輪回転数のみによる測位についても同信号を用いて行った。相互相関関数の窓幅はビーコンの信号長を含む 0.12 s とした。移動環境には図 2.5 のとおり 4 機の音響ビーコンを設置し、各々から異なる周波数の音を連続して発信した。音響ビーコンの信号には各々 13, 15.5, 18, 20.5 kHz を中心とする帯域幅 2 kHz, 掃引時間 0.1 s のチャープ信号を用いた。音響ビーコンは同時に音を発するものとし、信号は間隔をおかず繰り返し送信した。移動ロボットのマイクロフォンには各ビーコンの音が同時に入るため、バンドパスフィルタを用いてこれらを分離した。バンドパスフィルタのカットオフ周波数は、各ビーコンの周波数帯域 $[f_L, f_H]$ (Hz) に対し、 $[0.99f_L, 1.01f_H]$ (Hz) とした。位置の真値は 18 台のカメラ (Prime 41, OptiTrack) 及び位置計算ソフトウェア (Motive body, OptiTrack) から成るモーションキャプチャシステムを用いて 120 Hz で計測を行った。実験は同じ経路に対して 10 回おこなった。

音源方向の評価値 $|\Delta\tau_k|$ のしきい値は 0.2 とし、これを超える値の場合には音源方向推定ができていないとして直前に推定できた音源方向を用いることとした。カルマンフィル

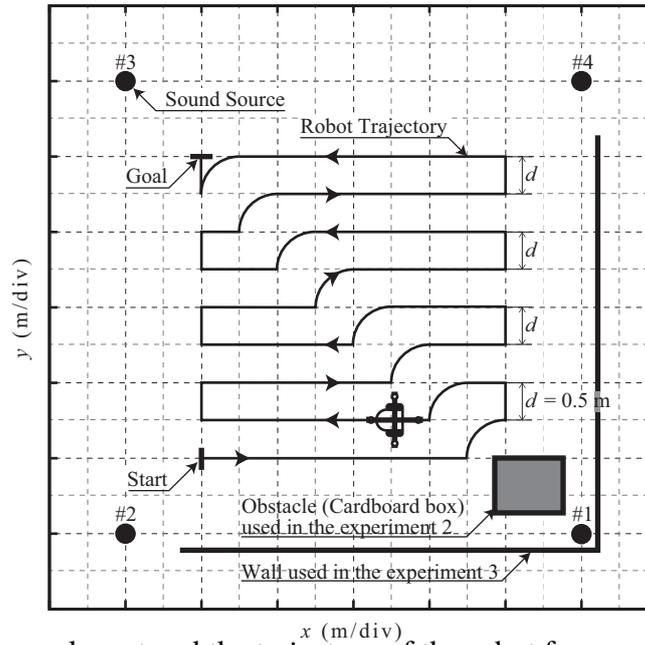


Fig. 2.5: Sound sources layout and the trajectory of the robot for experiment.

タの定数 R, Q は以下の通りとした.

$$R = 1 \times 10^6 \begin{bmatrix} \Delta\tau_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Delta\tau_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Delta\tau_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Delta\tau_4 \end{bmatrix} + 5I, \quad (2.18)$$

$$Q = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 10 \end{bmatrix}. \quad (2.19)$$

ここで, $\Delta\tau_1, \Delta\tau_2, \Delta\tau_3, \Delta\tau_4$ は (2.8) を描く音源について計算した値である.

実験は以下の3条件について行い, 提案法による測位のマルチパス等に対するロバスト性を評価した.

条件1: 反射・回折を発生させる障害物等がない場合 移動ロボットは測位対象となる空間内に障害物などがいない状態で移動し, これを対象として測位を行う. 以下に示す2条件との比較のため行う.

条件2：音源を遮蔽する障害物がある場合 測位対象となる空間内の音源が遮蔽された場合の測位結果を評価する．音源#1の前に段ボール箱(高さ1 m, 幅・奥行き0.5 m)をFig. 2.5に示すように配置した．

条件3：音源の背後に壁面がある場合 測位に用いる音源の背後に壁面があり, 反射が無視できない場合の測位結果を評価する．壁面はFig. 2.5に示すように配置した．

以上の3条件で計測した車輪回転数及びマイクロフォンアレイの録音信号について, 提案法による測位を比較するため, 以下の測位法についても同じ計測値を用いて測位を行った．

車輪回転数を用いる測位 車輪回転数を積算することで測位を行う手法(オドメトリ)と比較した．これは提案法のうち予測ステップに用いているものであり, 当該手法との比較により音源方向推定による測位への影響を考察できる．オドメトリでは式2.9に示す積算を各計測ごとに行い, 位置を求める．上式から明らかなように, 速度 v 及び角速度 ω に生じる計測誤差は考慮されておらず, これらの誤差は時間とともに積算される．このため, 計測誤差が無視できない長期間・長距離の測位では測位結果に誤差が積算され不正確になる．

音源方向のみを用いる測位 各音源について, 音源位置が既知かつ音源方向を推定できる場合, 次の原理でマイクロフォンアレイの位置と姿勢を式2.11による求めることができる．まず, $\boldsymbol{\theta} \equiv [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]^T$ とし, 式2.11の両辺の差を $h_s(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{x})$ と定義する．ある位置 \boldsymbol{x} に対し, 音源方向がすべて理想的な値である場合, $h_s(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{x})$ は0となる．このことから, マイクロフォンアレイで推定した音源方向 $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ を用いて, 音源方向による測位は次式の通り表すことができる．

$$\hat{\boldsymbol{x}} = \min_{\boldsymbol{x}} h_s(\hat{\boldsymbol{\theta}}, \boldsymbol{x}). \quad (2.20)$$

上式に基づく測位を行い, 提案法による測位と比較を行う．

Table 2.1: Localization error of experiment 1(lower is better)

Method	Error direction	Mean	Standard deviation	Unit
Wheel-based odometry	Location (x, y)	(-0.039, -0.672)	(0.22, 1.54)	(m)
	Pose	0.077	0.24	(rad)
Self-localization using only DOA	Location (x, y)	(2870, -1920)	(4020, 2790)	(m)
	Pose	-0.069	0.48	(rad)
Proposed Method	Location (x, y)	(0.040, -0.069)	(0.20, 0.20)	(m)
	Pose	-0.022	0.27	(rad)

2.4 結果・考察

2.4.1 遮蔽物や壁面のない場合

条件1について、Fig. 2.7(a)に測位結果の例を示す。また、Figs. 2.7(b)-(d)に10回の実験で得られた $\boldsymbol{x} = [x_r \ y_r \ \theta_r]^T$ の各変数についての推定結果を示す。この結果から、車輪回転数のみを用いる測位では時間とともに誤差が蓄積しており、また音源方向のみを用いる測位の場合は大きく測位誤差が発生していることがわかる。これに対し提案法では時間とともに蓄積する誤差はなく、また外れ値となる測位誤差も発生していないことが確認できる。条件1に関する測位誤差の一覧を Table 2.1 に示す。各手法について各軸方向の測位誤差を計算すると、車輪回転数のみを用いる手法では y 軸が最も大きく平均 0.67 m、標準偏差 1.5 m 程度の測位誤差が発生するのに対し、提案手法では平均 0.069 m、標準偏差 0.2 m 程度の誤差であった。

Figures 2.6 に条件1における音源方向推定誤差と各音源に関する $\Delta\tau_k$ を示す。 $\Delta\tau_k$ は音源方向の不正確さを表す値であり、マイクロフォンアレイで計測した到来時間差の幾何学的な整合性がよいほど0に近い値となる。 $\Delta\tau_k$ が大きい場合、音源方向が不正確であるといえる。提案法ではカルマンフィルタで用いる観測値の分散行列 R の対角成分に $\Delta\tau_k$ を用いている。このため、 $\Delta\tau_k$ が大きくなるほど、対応する音源 k に関する音源方向推定値の分散が大きいと仮定して推定するため、カルマンフィルタによる測位に音源方向推定値が寄与しづらくなる。これにより音源方向推定値が大きく誤差を保つ場合でも測位への影響を少なくできる。この効果は例えば Figs. 2.6(d) で確認できる。音源#4 に関する音源方向誤差が 0 s から 40 s まで大きいにもかかわらず、2.7(b)-(d) に示す提案法による測位結果にはこの影響がほとんどみられない。このほか、Figs. 2.6(a)(c) にも同様の傾向が確認できる。これらのうち 160 s から 200 s までは分散が大きいものの、対応する音源の $\Delta\tau_k$ も大きくなっていることから、測位結果に大きな影響が見られない。

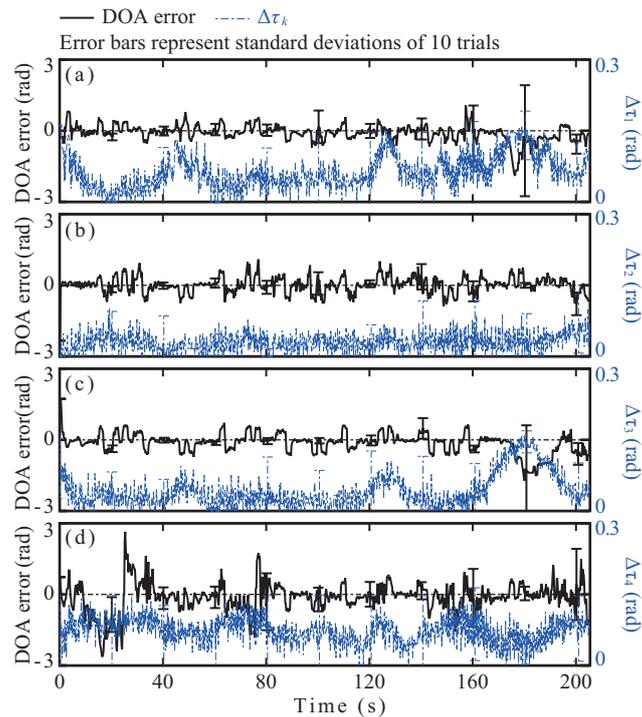


Fig. 2.6: DOA error and $\Delta\tau_k$ of sound 1 in experiment 1.

2.4.2 遮蔽物がある場合

Figures 2.9(a) に条件2について測位を行った結果の一例を示す。また, Figs. 2.9(b)-(d) に各軸方向の推定結果を示す。Figure 2.9(a) から, 提案法による測位結果は他の手法に比べ真値に近い値となっていることが確認できる。条件2に関する測位誤差の一覧を Table 2.2 に示す。表から分かる通り, Fig. 2.7(a) の場合と比較すると平均で 60 mm 程度測位誤差が大きくなっている。

Figure 2.8 に条件2における音源方向推定誤差と各音源に関する $\Delta\tau_k$ を示す。Figure 2.8(a) と Fig. 2.6(a) を比較すると音源#1 を遮蔽した場合に大きな誤差が生じており, 遮蔽による音源方向推定への影響が確認できる。音源方向推定誤差の平均値もしくは分散が大きくなる場合, これに従って $\Delta\tau_k$ も大きくなっていることが確認できる。遮蔽されている場合も音源1の音源方向が正しく計測できる場合があるが, この場合には $\Delta\tau_k$ が小さくなっている。これらから, 音源方向誤差の不正確さを $\Delta\tau_k$ はよく表現しており, これによって不正確な音源方向を測位に反映させず測位誤差の増加を防いでいる。

このような音源方向誤差に対応する $\Delta\tau_k$ の動きは音源からの回折によると考えられる。障害物を回り込んで音が到来する際, マイクロフォンアレイでは複数方向から到来する音

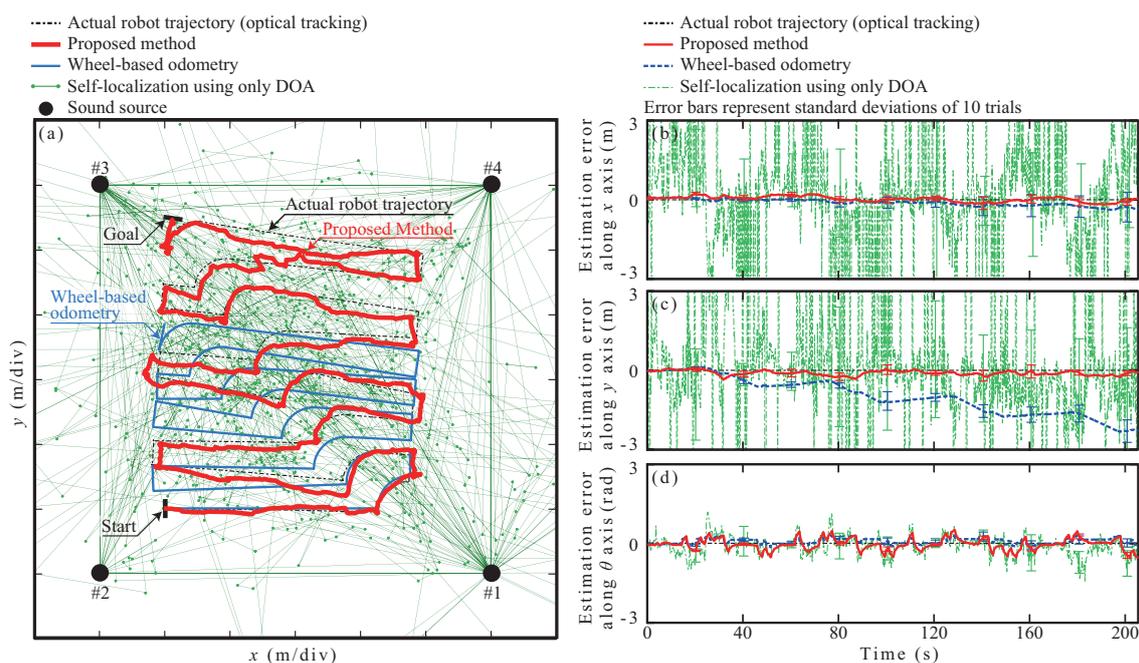


Fig. 2.7: An example of self-localization result in experiment 1.

Table 2.2: Localization error of experiment 2(lower is better)

Method	Error direction	Mean	Standard deviation	Unit
Wheel-based odometry	Location (x, y)	(-0.098, -0.590)	(0.32, 1.56)	(m)
	Pose	0.154	0.28	(rad)
Self-localization using only DOA	Location (x, y)	(1660, -2360)	(6300, 18900)	(m)
	Pose	-0.046	0.65	(rad)
Proposed Method	Location (x, y)	(0.045, -0.088)	(0.18, 0.23)	(m)
	Pose	-0.029	0.26	(rad)

を受信することになる。これにより $\tau_{12,k}$ と $\tau_{34,k}$ が各々で異なる到来方向の音もしくはこれらの合成による最大値を検出することになり、この矛盾を $\Delta\tau_k$ が表現している。以上のことから、音源方向誤差が生じる場合でも、極端な測位誤差の増加が見られないことを確認した。

2.4.3 壁面による音のマルチパスがある場合

Figure 2.10(a) に条件 3 について各手法で測位を行った結果の一例を示す。提案法については概ね条件 2 における測位結果と同様の測位ができていることが確認できる。Figures 2.10(b)-(d) に条件 3 における各軸方向の測位誤差を示す。10 回の計測を行っている

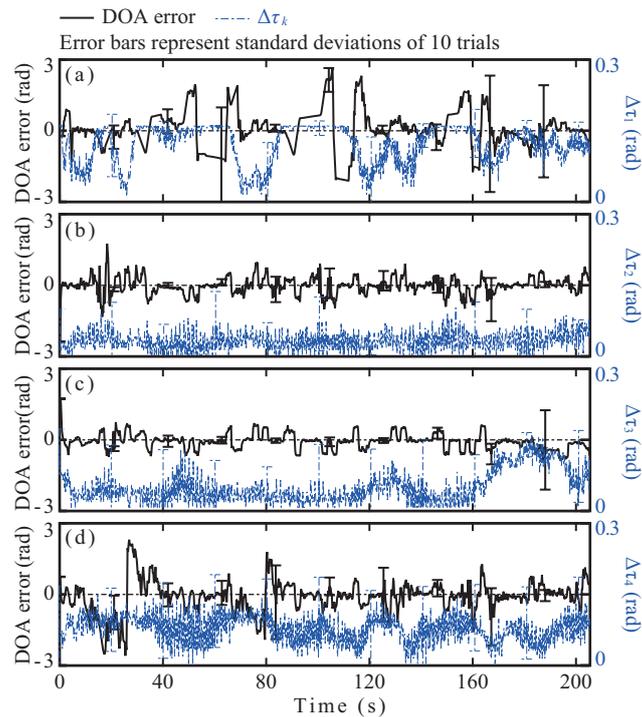


Fig. 2.8: DOA error and $\Delta\tau_k$ of sound 1 in experiment 2.

が、移動ロボットの速度制御のみで位置に関するフィードバック制御を行っていなかったことから10回中2回は移動ロボットが壁に衝突したため、当該結果は8回の実験の平均・分散を示している。条件3に関する測位誤差の一覧をTable 2.3に示す。提案法による測位結果はとくに経路の終わりで測位誤差が大きくなっていることが確認できる。

Figure 2.11に条件3における音源方向誤差を示す。このうち、音源#3に関する音源方向誤差が大きくなっていることが確認できる。音源#3は壁面に対して対向する位置にあり、発する測位信号は比較的周波数帯域が高い。マイクロフォンアレイが音源#3の正面にない場合、場所によっては壁面等からのマルチパスのほうが音が大きくなる場合がある。マルチパスのほうが録音信号の中で支配的な場合には、直達する音ではなくマルチパスの音源方向を推定することになる。この場合、反射音自体は特定の方向から到来する音とみなすことができ、 $\tau_{12,k}$ と $\tau_{34,k}$ は条件2の回折とは異なり矛盾しない。そのため、音源#3の音源方向誤差が大きくなった場合でも、 $\Delta\tau_k$ が他の条件ほど大きくならない。これは提案法では解決できず、マイクロフォン間の幾何学的関係によらない他の手法が必要である。他方で、顕著な反射以外については概ね測位が可能である。

以上のことから、提案法により音源方向の不正確さを評価し、これを用いることで非同

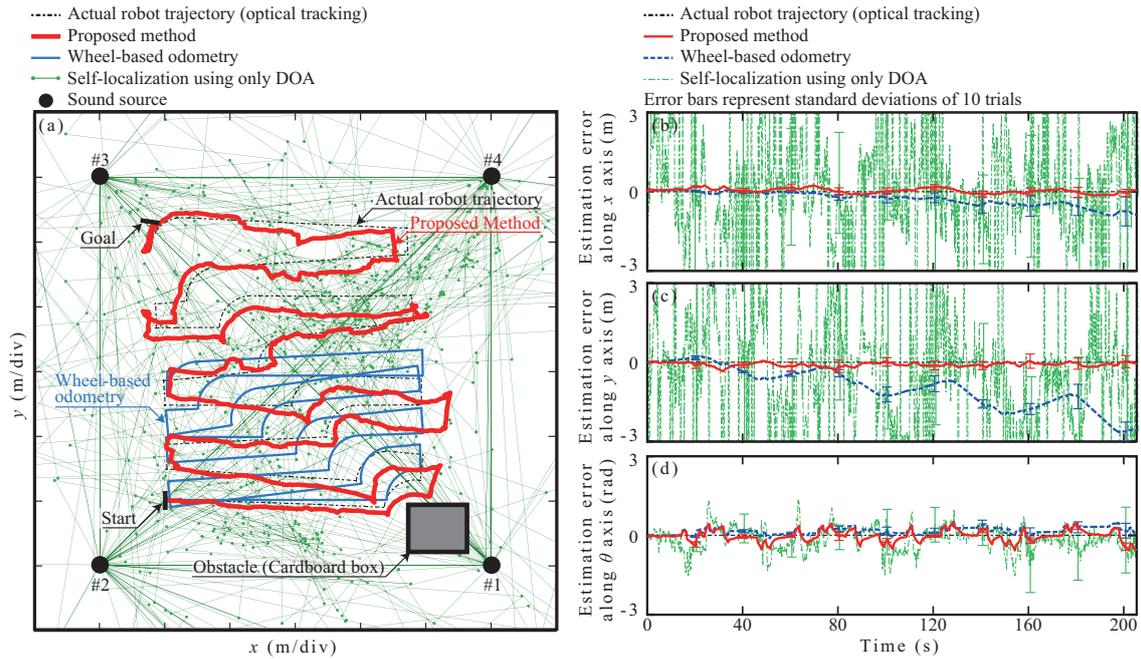


Fig. 2.9: An example of self-localization result in experiment 2.

Table 2.3: Localization error of experiment 3(lower is better)

Method	Error direction	Mean	Standard deviation	Unit
Wheel-based odometry	Location (x, y)	(-0.020, -0.49)	(0.128, 1.69)	(m)
	Pose	0.096	0.24	(rad)
Self-localization using only DOA	Location (x, y)	(620, -530)	(1.17, 470)	(m)
	Pose	-0.076	0.62	(rad)
Proposed Method	Location (x, y)	(0.117, -0.047)	(0.23, 0.20)	(m)
	Pose	-0.069	0.26	(rad)

期の音響ビーコンを用いて測位が可能であることを示した。

2.5 まとめ

本章では音響ビーコンの時刻同期不要で測位が可能なる手法を提案した。また、この際に課題となる音源方向の外乱に対し、マイクロフォンアレイの幾何学的な関係から音源方向の正しさを示す指標を提案した。提案法は音源方向推定結果と車輪回転数を拡張カルマンフィルタにより統合し測位を行う。提案法について実験によりその有効性を検証した。実験では4機の音響ビーコンを6m四方の空間に設置し、この中をマイクロフォンアレイを搭載したロボットを走行させその位置を推定した。その結果、提案法を用いることで

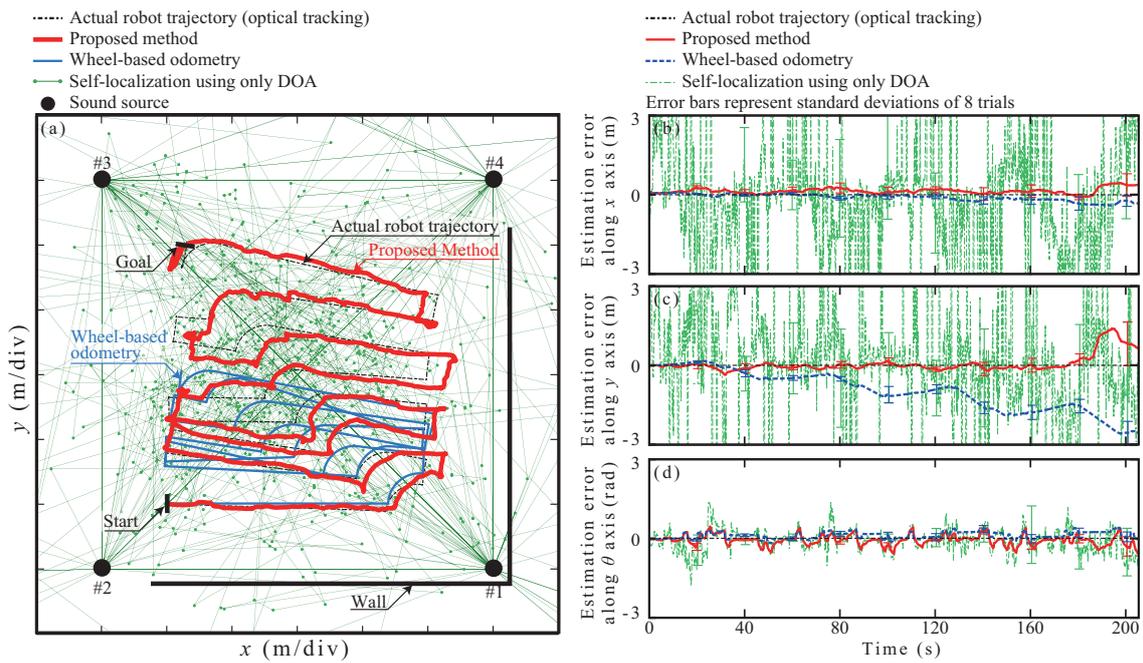
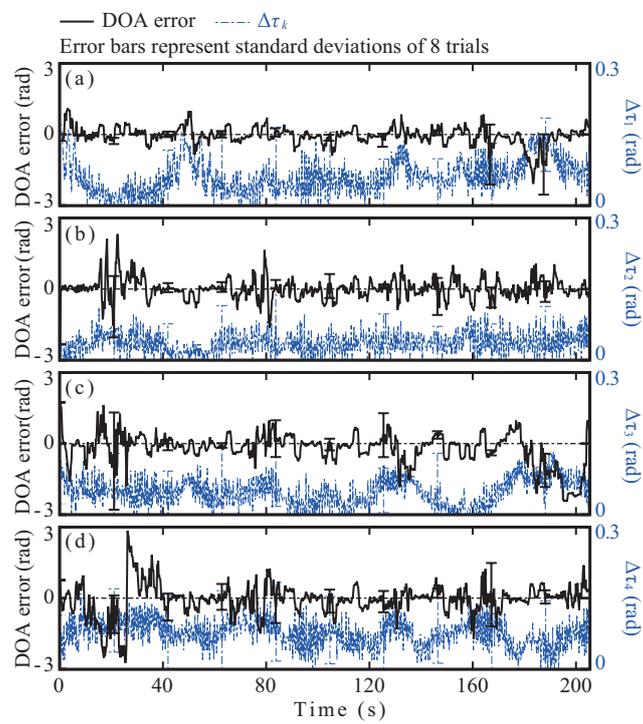


Fig. 2.10: An example of self-localization result in experiment 3.

位置推定結果が時間とともに発散するなどがなく測位が可能であることを示した。また、提案した音源方向の正しさの指標 $\Delta\tau_k$ について、音源方向の不確かな付近で $\Delta\tau_k$ が大きくなることを確認した。これにより音源方向が正しく推定できない場合でも提案法による測位結果は大きな影響を受けておらず、ロバストな測位が可能であることを示した。

Fig. 2.11: DOA error and $\Delta\tau_k$ of sound 1 in experiment 3.

第3章 非同期音響ビーコンの配置及び信号設計

3.1 はじめに

音響測位では位置及び発する信号が既知のビーコンを環境中へ配置する。このうちビーコンの配置によって測位における測位の精度が変化することが知られている。これまで GNSS などでは Dillusion of Precision(DOP) と呼ばれる、衛星と受信機の幾何学的配置を用いる指標が用いられている。この指標では測位に用いる距離計測誤差が測位結果にどの程度影響するかを定量化して表しており、衛星配置や受信状態の評価に用いられている。しかし当該指標は TOA を用いる測位に関して定量化されており、DOA を用いる測位には適用できない。DOA を用いる測位に関して DOA を定義する試みもあるが、測位対象が信号を発する形式のシステムについてのみ検討されており [54]、提案法のように測位対象で音源方向を計測する場合には適用できない。他方、ビーコンが発する信号に求められる性能として、自己相関がある時刻で最大値となり、それ以外では十分低いことが求められる。これらビーコンの配置や擬似乱数系列の影響について、TOA もしくは TDOA を用いる測位に関しては多数の研究があるが [55]、音源方向を用いる測位については検討されていない。本章では測位に用いるビーコンの配置及び擬似乱数系列を用いる場合のパラメータの影響について検討を行う。

3.2 音響ビーコンの配置による測位精度予測指標

逆問題の解の求めやすさの指標として条件数がある。しかしながら、条件数は線形な方程式を前提とするため、Fig. 3.1 に示す座標系を考えた場合、式 (2.11) のような非線形な測位の問題には直接適用できない。そこで測位誤差は真値の周辺に小さな誤差を及ぼすと仮定し、下記の通り式 (2.11) のヤコビアンを計算し、これについて条件数を求める手法を

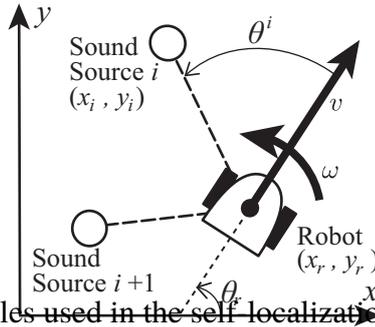


Fig. 3.1: Variables used in the self-localization methods.

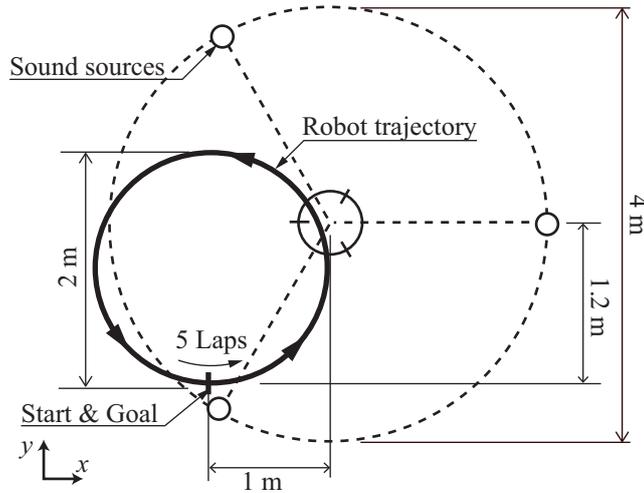


Fig. 3.2: Numerical experiment condition.

提案する [56].

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{f}_s(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} -(y_1 - y_r)/d_1 & (x_1 - x_r)/d_1 & 1 \\ -(y_2 - y_r)/d_2 & (x_2 - x_r)/d_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -(y_n - y_r)/d_n & (x_n - x_r)/d_n & 1 \end{bmatrix}; \quad (3.1)$$

これを用いて、上式 $\frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{f}_s(\mathbf{x})$ の条件数 C は以下のように求められる。

$$C = \left\| \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{f}_s(\mathbf{x}) \right\| \left\| \left(\frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{f}_s(\mathbf{x}) \right)^{-1} \right\|. \quad (3.2)$$

条件数による測位への影響評価を行うため、各位置の条件数と想定しうる誤差が発生した場合の測位結果をシミュレーションにより求めた。シミュレーションに用いた配置を Fig. 3.2 に示す。このとき誤差として次の2種類の誤差を与えた：(a) 音源方向のばらつきによる測位誤差を評価するため、ガウシアンノイズ $N(0, 0.02)(\text{rad}, \text{rad}^2)$ を各音源方向に加えた場合の測位誤差、(b) 音源位置が想定と異なる場合を評価するため、音源#3の位置を

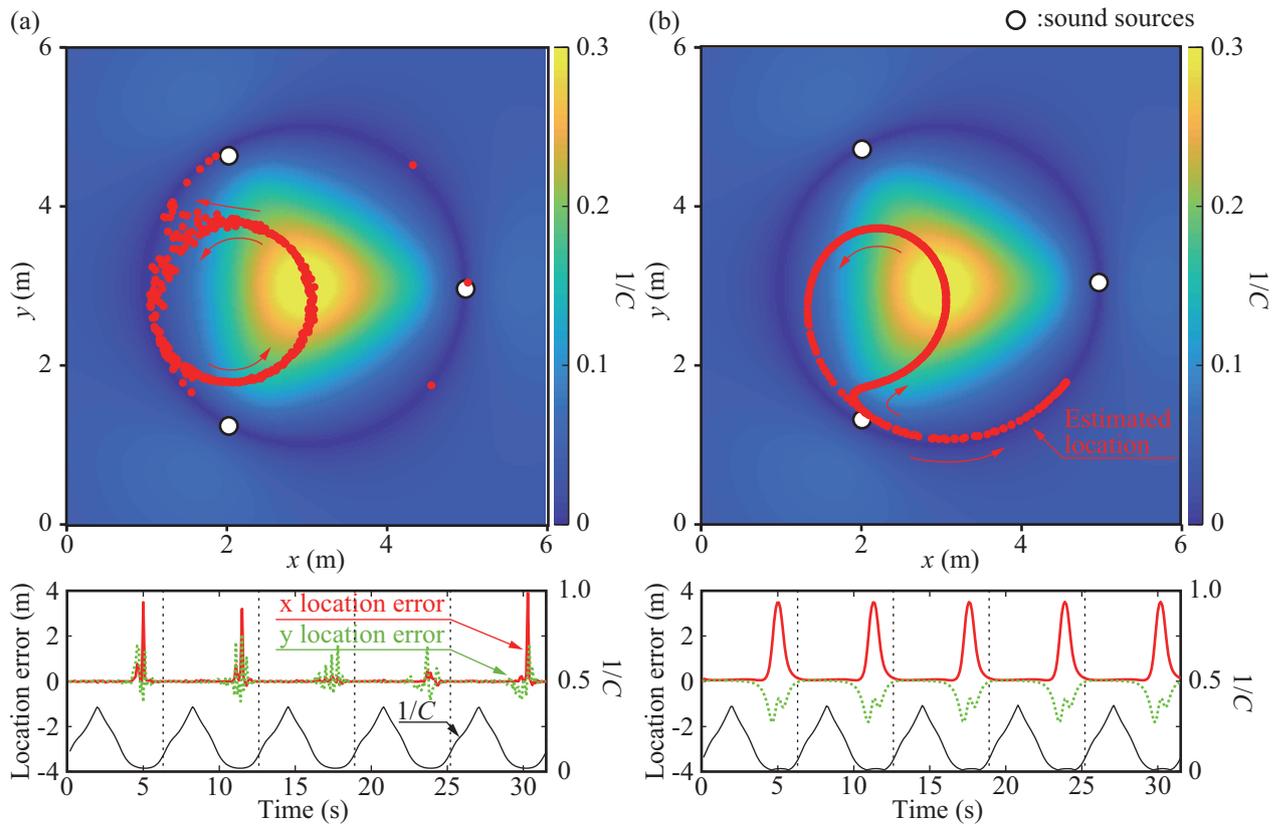


Fig. 3.3: Results of self-localization numerical experiments. (a) self-localization only using odometry of wheel rotation, (b) self-localization using DOAs of landmarks (assuming no noise exist), (c) self-localization using DOAs of landmarks (assuming Gaussian white noise was included), (d) self localization using DOAs of landmarks (assuming sound location error).

測位で仮定している音源位置 (x_3, y_3) (m) に対し実際の音源を $(x_3 + 0.1, y_3 + 0.1)$ (m) に配置した上での測位誤差を評価した。この結果、図 3.3 に示すとおり、測位誤差の大きさは提案した条件数に対応する形で変化することを確認した。

3.3 擬似乱数系列を用いる場合のパラメータによる測位への影響

これまで示した音響ビーコンを用いる測位では、周波数分割による音源分離を行う。この方法はバンドパスフィルタによって用意に音源分離可能という利点がある一方で、各ビーコンは周波数帯域を専有する必要がある。周波数帯域幅の広さが時間分解能に影響を及ぼすことからなるべく周波数帯域幅を広くしたいものの、限られた周波数帯域内の周波

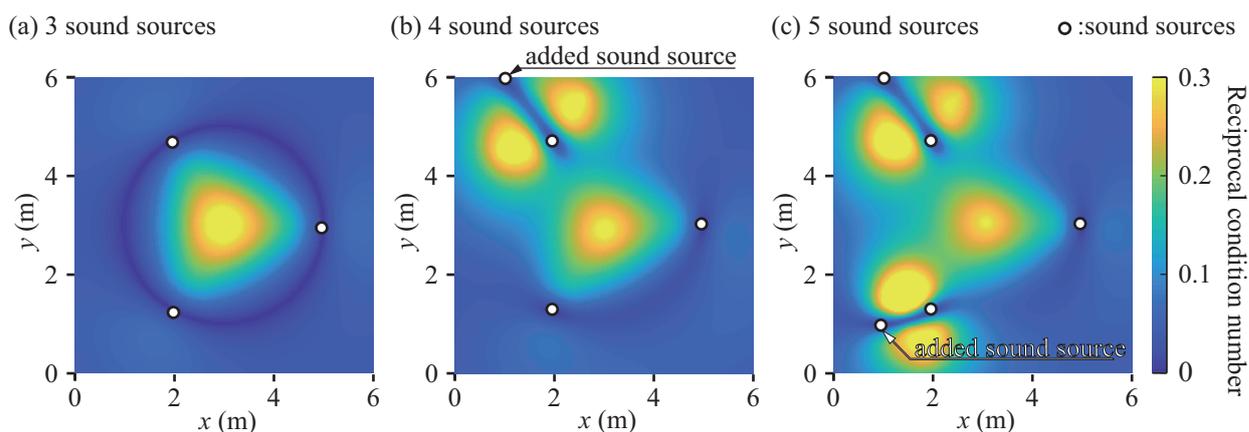


Fig. 3.4: Reciprocal conditional number distribution and sound source layouts, (a) 3 sound sources, (b) 4 sound sources, (c) 5 sound sources

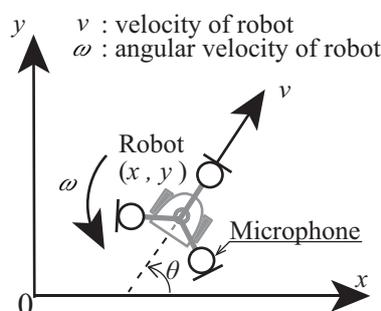


Fig. 3.5: Location and heading direction of mobile robot in absolute coordinate system $x - y$. ©2016 IEEE.

数分割による音響ビーコンの多重化には設置数と周波数帯域幅がトレードオフの関係にある。この制約に対し、擬似乱数系列を用いる音響測位が提案されている。音響測位のための擬似乱数系列としてはM系列符号 [57], Gold符号 [58–60], 嵩符号 [61], バーカー符号 [62] などが用いられており、その変調方式についても検討されている。しかしながら、これまで到来時間及び到来時間差による測位に関してのみ検討されており、音源方向を用いる測位に擬似乱数系列を用いた例はない。本章では擬似乱数系列を音響ビーコンとして用いた場合の音源方向推定及び音響測位の特性について、そのパラメータを変化させたときの影響を検討する。

M系列符号とスピーカからビーコン音として発するための変調方式

音響測位で音響ビーコンから発する信号は以下のような性質が求められる。

- 各ビーコンの信号は識別可能であること。

- 自己相関関数が時刻0で卓越したピークを持ち、それ以外では大きな値をもたないこと。
- 他のビーコンの発する信号との相互相関関数が自己相関関数に比べ十分低い値になること。
- スピーカから出力可能な信号であること。

これらの要求を満たす信号は以下に示すM系列符号とこれの変調により生成することができる。M系列符号は以下の式によって表すことができる。

$$x_i = \sum_{n=1}^p a_n x_n \pmod{2} \quad (3.3)$$

ここで p は次数、 a_n はM系列符号生成のための係数で $x, a_n, f(x) \in \{0, 1\}$ である。少なくとも1である変数が1つ以上ある適当な初期値 $x_1 \dots x_p$ と適切な係数から、上記の式から最も長い周期 $N = 2^p - 1$ をもつ符号 $m_p(i), i > p$ を生成することができ、これをM系列符号と呼ぶ。以下、時間信号として考えるため、時刻 t に関する式 $m_t(t)$ を以下のように考える。

$$m_t(t) = \begin{cases} 0 & m_p(\lfloor t/T_c \rfloor) = 0 \\ 1 & m_p(\lfloor t/T_c \rfloor) = 1 \end{cases} \quad (3.4)$$

ここで T_c はチップに相当し、チップレートは $f_b = 1/T_c$ で表される。

このように生成したM系列信号をスピーカから再生する際には、スピーカで出力しやすい周波数帯の信号にする必要がある。本研究ではM系列符号を用いて二位相偏移変調(Binary Phase Shift Keying : BPSK)を行うものとする。M系列符号で生成される0と1はBPSKの位相0と π (rad)に対応させる。キャリア周波数を f_c とし、音響ビーコンから発する変調信号を $s_m(t)$ として以下の通り定義する。

$$s_m(t) = \sin(2\pi f_c t + \pi m_t(t)) \quad (3.5)$$

3.3.1 音響ビーコンのパラメータによる音源方向推定への影響評価シミュレーション

音響測位における音響ビーコンのパラメータの影響を評価するため、移動ロボットの測位シミュレーションを行った。移動ロボットはFig. 3.6に示す経路を1周走るものとし、

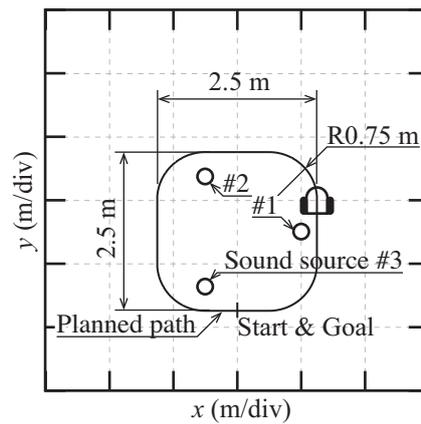


Fig. 3.6: Geometrical condition of simulation. ©2016 IEEE.

Table 3.1: Condition of simulations. ©2016 IEEE.

Robot velocity	1 m/s
Sampling frequency of wheel rotation	5 Hz
Sampling frequency of microphones	100 kHz
Sound characteristics	
Sound type	Linear up chirp
Sweeping time	0.1 s
Sweeping frequencies	
Sound 1	15 – 18 (kHz)
Sound 2	5 – 8 (kHz)
Sound 3	10 – 13 (kHz)

この間の車輪回転数およびマイクロフォンの録音信号をシミュレートした。音源は Fig. 3.6 に示すとおり配置し、これらからチャープ信号及び M 系列符号による変調信号を発生した。シミュレーション条件の詳細を Table 3.1 に示す。シミュレーションにおいて、M 系列符号の変調信号を生成するためのパラメータ f_b , f_c , p の変化による測位への影響を考察するため、次の3つの条件についてシミュレーションを行った。(a) $f_c=10$ kHz, $p=10$ に固定し, f_b を 13 種類 (0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1, 2, 3, 5, 7, 10, 20, 30, 50 (kHz)) に変化させる, (b) $f_b=10$ kHz, $p=10$ に固定し, f_c を 10 種類 (1, 2, 3, 5, 7, 10, 20, 30, 50, 70 (kHz)) に変化させる, (c) $f_c=10$ kHz, $f_b=10$ kHz に固定し, p を 7 種類 (6, 7, 8, 9, 10, 11, 12) に変化させる。特に (c) において生成多項式は Table 3.2 に示す係数とした。

M 系列信号のパラメータと音源方向推定誤差の関係を Fig. 3.7 に示す。まず Fig. 3.7(a)–(b) から、このシミュレーション条件では $f_b = 10^4$ Hz 付近、及び $f_c < 2^4$ kHz で音源方向誤差が小さくなることがわかる。これらはチップレートに対してキャリア周波数が大きくなることで、変調信号の自己相関関数がキャリア周波数の正弦波の自己相関関数に近くなる

Table 3.2: Generating polynomials used in simulation

Order	Sound source 1	Sound source 2	Sound source 3
6	$x^6 + x + 1$	$x^6 + x^4 + x^3 + x + 1$	$x^6 + x^5 + 1$
7	$x^7 + x + 1$	$x^7 + x^3 + 1$	$x^7 + x^3 + x^2 + x + 1$
8	$x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$	$x^8 + x^4 + x^2 + 1$	$x^8 + x^5 + x^3 + x^2 + 1$
9	$x^9 + x^4 + 1$	$x^9 + x^6 + x^4 + x^3 + x + 1$	$x^9 + x^8 + x^5 + x^4 + 1$
10	$x^{10} + x^3 + 1$	$x^{10} + x^4 + x^3 + x + 1$	$x^{10} + x^5 + x^2 + x + 1$
11	$x^{11} + x^2 + 1$	$x^{11} + x^4 + x^2 + x + 1$	$x^{11} + x^5 + x^3 + x + 1$
12	$x^{12} + x^6 + x^4 + x + 1$	$x^{12} + x^6 + x^5 + x^3 + 1$	$x^{12} + x^6 + x^5 + x^4 + x^3 + x + 1$

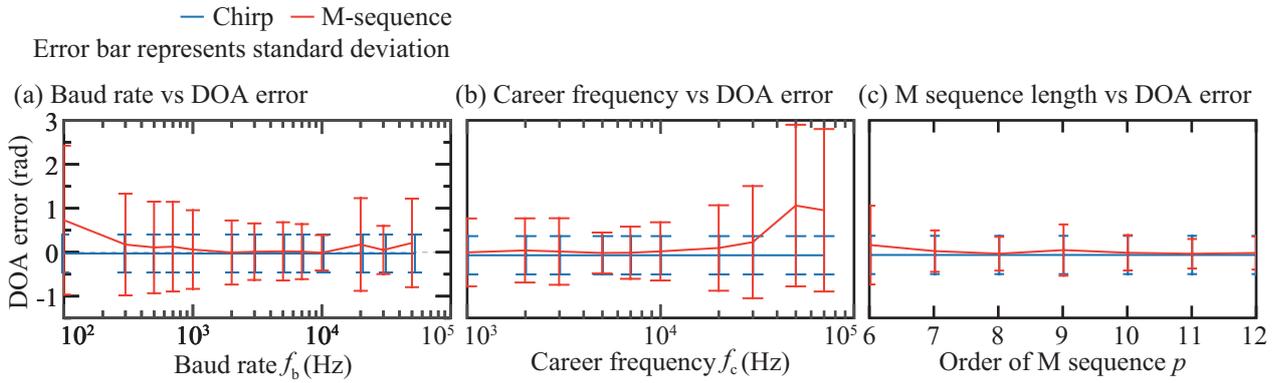


Fig. 3.7: Parameters vs. DOA estimation error. (a) baud rate f_b vs. DOA error ($f_c = 10$ kHz, $p = 10$). (b) carrier frequency f_c vs. DOA error ($f_b = 10$ kHz, $p = 10$). (c) Order of M sequence p vs. DOA error ($f_c = 10$ kHz, $f_b = 10$ kHz). ©2016 IEEE.

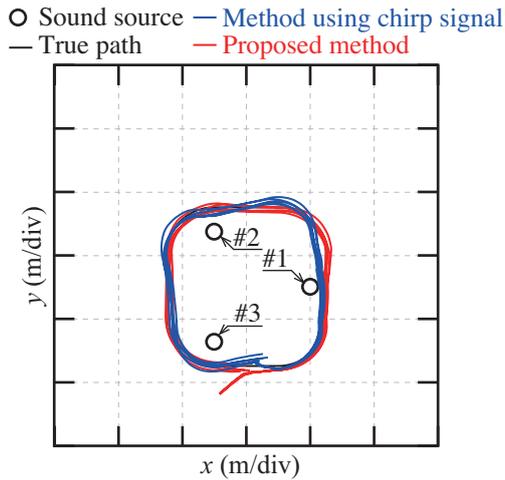


Fig. 3.8: Result of localization. $f_c = 10$ kHz, $f_b = 10$ kHz, $p = 10$. ©2016 IEEE.

ことに起因すると考えられる。Figure 3.7(c) から、M 系列の次数 p は音源方向推定に大きな影響を及ぼさないことが確認できる。自己相関関数に卓越したピークを生じるのに十分

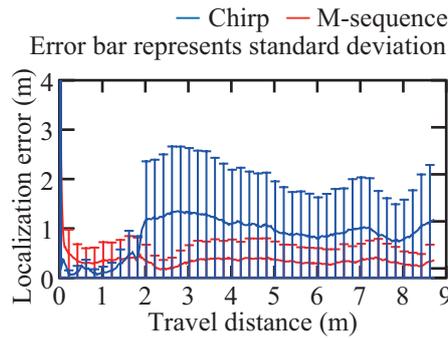


Fig. 3.9: Localization error vs. travel distance of mobile robot ($f_b = 10$ kHz, $f_c = 10$ kHz, $p = 10$). ©2016 IEEE.

な符号長があれば音源方向を推定できることに起因すると考えられる。ただし、符号長が長い場合はこれに比例して測位信号1周期の時間が長くなるため、移動時のドップラシフトによる影響を受けやすくなる可能性がある。この点については次節で検討を行う。

以上の結果を元にM系列符号を用いる変調信号のパラメータを $f_b = 10$ kHz, $f_c = 10$ kHz, $p = 10$ とし、チャープ信号を用いる場合と測位結果を比較する。シミュレーションで得た車輪回転数およびマイクロフォン信号を用いる測位結果を Fig 3.8 に示す。この結果から、まずM系列符号を用いる場合でも測位が可能であることがわかる。5回のシミュレーションにおける測位誤差と走行距離の関係を Fig 3.9 に示す。チャープ信号を用いる場合測位誤差が0.3から1mであるのに対し、M系列符号を用いる場合は測位誤差の平均値が0.5mである。以上より、M系列符号を用いる場合、チップレートとキャリア周波数が音源方向推定に影響を与え、これらを適切に設定することで測位が可能であることを示した。

3.4 擬似乱数系列を用いる場合のパラメータによるドップラシフトの影響

音響測位において、音のドップラシフトは測位に影響を与える課題として知られている。これまで、ドップラシフトが伝搬時間方式の測位信号計測時の相互相関関数へ与える影響 [63], 伝搬時間方式の測位への影響 [64] などが調べられてきた。一方で、これらはすべて単一のマイクロホン为前提としており、本研究で提案する非同期ビーコンとマイクロフォンアレイを用いる場合の検討はされていない。

本章では擬似乱数系列を用いる測位信号について、マイクロホンアレイの素子間の到来時間差にドップラシフトが与える影響を明らかにする。ドップラシフトによる影響に

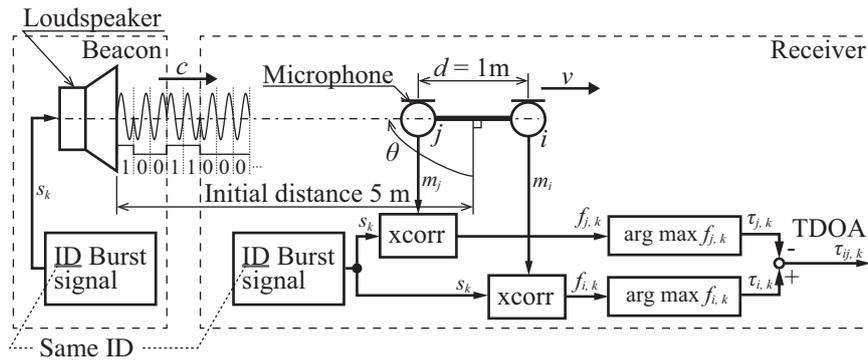


Fig. 3.10: Simulation condition and description of TDOA estimation method

は原理の異なる2種類の影響がある。ひとつはマイクロフォンの移動による見かけ上の音速の変化であり，これによってマイクロフォン素子間の到来時間差が物理的に変化する。この変化は理論的に求めることができ，予測可能である。もうひとつの影響はマイクロフォンでの受信信号と音響ビーコンの送信信号の相互相関関数が変化することである。マイクロフォンを用いる音の伝搬時間推定はマイクロフォンでの受信信号と音響ビーコンの送信信号の相互相関関数が最大値となる時間差によって計測するのが一般的である。ドップラシフトによってこの相互相関関数が影響を受ける場合，最大値の大きさ，及び最大値となる時刻が変化することが考えられるが，このような変化は解析的に導くことが困難である。本章ではこれら2面からドップラシフトによるマイクロフォン間の伝搬時間推定値の変化を考察する [47].

3.4.1 シミュレーション条件

ドップラシフトによる影響を考察するため，マイクロホンアレイが低速で直線状に動く場合を仮定し計算機シミュレーションを行った。Figure 3.10に実験条件を示す。2つのマイクロホンアレイ素子間は1mの間隔で，これらのマイクロフォンは同期して録音を行っているとは仮定する。マイクロフォンに対し遠距離場を仮定するため，音源は初期位置でマイクロフォンから5m離れた位置にあるとした。音源からは擬似乱数系列でBPSKにより変調した信号を送信した。音源の送信信号の生成多項式の係数，初期条件，擬似乱数系列及びその他のシミュレーション条件をTable 3.3に示す。マイクロフォンでの録音は測位信号1周期である n/f_b (s)の間行った。伝搬時間差は前述した相互相関法によって計測を行った。相互相関の窓幅は測位信号1周期の長さとした。前節での結果から，擬似乱数系列を用いる場合キャリア周波数 f_c 及びチップレート f_b が測位に影響を与えるため，こ

Table 3.3: Common parameters of simulation

Sequence type	M, Gold, and Kasami
Sequence length n	255 (8th order)
Generation polynomials	
M sequence	[8, 7, 6, 5, 2, 1, 0]
Gold sequence	[8, 7, 6, 5, 2, 1, 0]
	[8, 7, 6, 1, 0]
Kasami sequence	[8, 4, 3, 2, 0]
	$m = 1$
Initial conditions	[0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1] for all sequences
Sampling rate	400 kHz

れらを変化させた際のドップラシフトの影響を検討した。これらパラメータの詳細は次のとおりである。

1. チップレートを $f_b = 5$ kHz に固定した上で、キャリア周波数 f_c を変化
キャリア周波数が高いほどドップラシフトによる影響を強く受けると予想できる。音響測位で用いることができる 0 Hz (ベースバンド) から 40 kHz (超音波による測位) の範囲について検討を行う。
2. キャリア周波数を $f_c = 20$ kHz に固定した上で、チップレート f_b を変化
チップレートが高いほど広い周波数に渡って符号が拡散される。実際に用いられる可能性のあるチップレートを網羅するため、0.5–20 kHz (キャリア周波数) の範囲について検討を行う。

マイクロホンアレイの移動による伝搬時間差の物理的な変化量 $\Delta\bar{\tau}$ については、Fig. 3.10 に示す物理量を用いて次式の通り表すことができる。

$$\Delta\bar{\tau} = \frac{d \sin(\theta)}{c - v} - \frac{d \sin(\theta)}{c}. \quad (3.6)$$

ここで、第一項は速度 v による音速の見かけ上の変化を考慮した伝搬時間差であり、第二項は移動を考慮しない場合の伝搬時間差である。いずれの条件についても上記変化量を計算し、これを真値として相互相関関数の変化によるドップラシフトの影響を考察する。

また、相互相関関数の変化を評価する上で、最大値をどの程度見つけやすいかを評価することが重要である。本研究ではこれを最大値対実効値比 (Peak to Average Power Ratio : PAPR) として評価する事を考える。Figure 3.11 に示す変数を用いて、PAPR を次式のとお

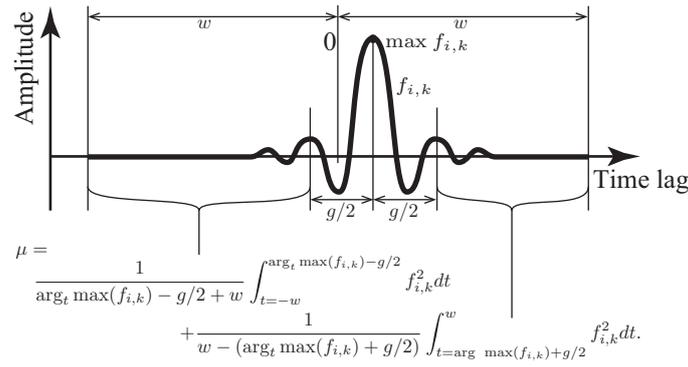


Fig. 3.11: Definition of variable used for calculation of PAPR

り定義する.

$$p = \frac{\max f_{i,k}^2}{\mu}, \quad (3.7)$$

ここで μ はピーク以外の実効値を表す値であり、次式により求められる.

$$\mu = \frac{1}{\arg_t \max(f_{i,k}) - g/2 + w} \int_{t=-w}^{\arg_t \max(f_{i,k}) - g/2} f_{i,k}^2 dt + \frac{1}{w - (\arg_t \max(f_{i,k}) + g/2)} \int_{t=\arg_t \max(f_{i,k}) + g/2}^w f_{i,k}^2 dt. \quad (3.8)$$

上式のうち g はガード幅であり、最大値の周辺を実効値計算に含まないための定数である。相互相関関数の最大値が大きく、かつそれ以外の時刻で小さな値となる場合、式 (3.7) は大きくなる。この値 p が大きくなるほどピークの検出が容易であることを示す。シミュレーションでは g は窓幅 w の 10% に設定した。

3.4.2 結果と考察

シミュレーション結果を Fig. 3.12 に示す。Figures 3.12(a)–(j) に f_c による伝搬時間差計測の変化を示す。Figures 3.12(a)–3.12(e) 及び Fig. 3.12(k)–3.12(o) は移動速度による伝搬時間差の変化、Fig. 3.12(f)–3.12(j) 及び Fig. 3.12(p)–3.12(t) はこれに対応する PAPR_p を示す。これらの図から、伝搬時間差の誤差は同じ速度に対してはキャリア周波数 f_c によって異なることがわかる。また、網掛け部として示しているように、 PAPR がある値を下回ると、伝搬時間差の誤差が極端に大きくなることがわかる。これを考察するため、一例として Fig. 3.12(e) 図中 P1 ($v = -1$ m/s) における相互相関関数、及び P2 ($v = 0$ m/s) における相互相関関数を Fig. 3.13(a)(b) に示す。Figure 3.13 から明らかなように、 p が大きい場合には相互

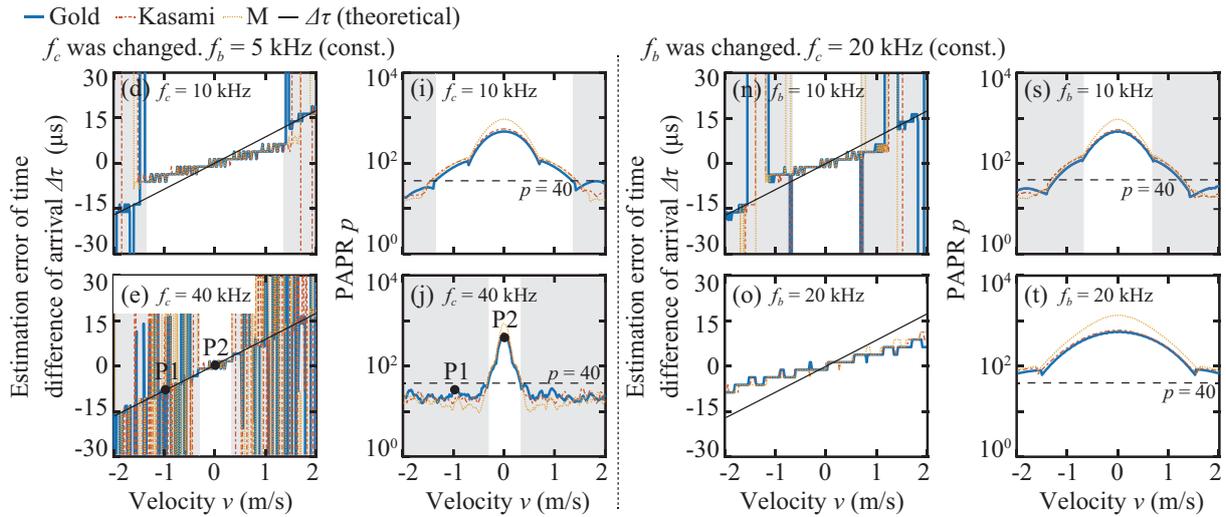


Fig. 3.12: Velocity v vs. error of time difference of arrival $\Delta\bar{\tau}$ and velocity v vs. PAPR p for different f_c and f_b . Shaded areas represent inaccurate TDOA.

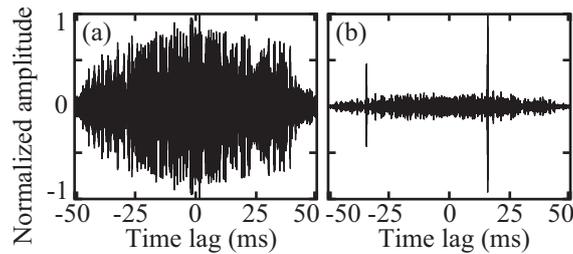


Fig. 3.13: Normalized cross correlation functions $f_{i,k}$ of Kasami sequence for each highlighted points in Fig. 3.12. (a) P1, $f_c = 40$ kHz, $f_b = 5$ kHz, $v = -1$ m/s, (b) P2, same condition to (a), $v = 0$ m/s.

相関関数に卓越したピークを生じた。このことから、PAPRを計算することで、この値が小さい場合には対応する伝搬時間差が不正確であるとわかる。この場合の p が小さい値とするしきい値として、本研究の条件では40程度が適当と考えられる。例外はFig. 3.12(f)であり、この場合は p が他の場合に比べ低い値でも伝搬時間差をよく計測できている。これは $f_c = 0$ であり、キャリアのエネルギーがPAPRに含まれないことで p の基準が変化していることによる。

Figures 3.12(k)–(t)にチップレート f_b を変化させた場合の結果を示す。これらから、チップレートはドップラシフトによる伝搬時間差の計測誤差に寄与しており、低いチップレートほど伝搬時間差の誤差が大きくなる傾向にあると確認できる。また、キャリア周波数を変化させた場合と同様に、PAPRが小さく40程度を下回った場合、伝搬時間差の誤差が極端に大きくなっていることが確認できる。チップレートが低いほど伝搬時間差の計測

誤差が大きくなる要因として、信号長が長くなることが挙げられる。チップレートに反比例して信号長が長くなるため、ドップラシフトによる影響を受けやすくなったと考えられる。シミュレーションから、いずれのチップレートにおいても伝搬時間差を極端な誤差なく推定できる速度の範囲があることがわかる。シミュレーションで用いたキャリア周波数 $f_c = 20$ kHz の場合、チップレート $f_b = 0.5$ kHz では -0.1 – 0.1 m/s, $f_b = 1$ kHz では -0.2 – 0.2 m/s, $f_b = 5$ kHz 及び 10 kHz では -0.6 – 0.6 m/s, $f_b = 20$ kHz では -2 – 2 m/s 以上の範囲である。特に $f_b = 20$ kHz では、到来時間差はドップラシフトによって極端な誤差を生じることなく、 -2 – 2 m/s の速度範囲で推定可能であることがわかる。以上のことから、PAPR を用いて評価を行うことで f_c 及び f_b を決定する目安が得られること、現実的なパラメータで人の歩行速度程度ではドップラシフトによる極端な誤差なく推定できるパラメータがあることを示した。

3.5 まとめ

本章では測位に用いるビーコンの配置及び擬似乱数系列を用いる場合のパラメータの影響について検討を行った。音源と位置の関係を表す方程式からビーコンの配置による測位精度の指標を提案し、その有効性を示した。また、ビーコンのパラメータにより測位精度が影響を受けること、人の歩行速度程度であればドップラシフトの影響を受けないパラメータを選択可能であることを示した。

第4章 少素子マイクロフォンの相互相関関数を尤度として用いるロバスト測位法

4.1 はじめに

前節までに提案した手法は3素子以上のマイクロフォンアレイを用いて音源方向を検出し、複数のビーコンの音源方向から測位を行う。この手法では音源方向のみを用いるため、マイクロフォンアレイの素子のみ同期されていればビーコンは非同期でも測位が可能である。しかしながら、当該手法では音源方向が強いマルチパスなどにより誤検出された場合、測位誤差が大きくなる。また、マイクロフォンアレイを用いて音源方向を推定する必要があるため、2次元平面内の測位には少なくとも3素子以上のマイクロフォンが必要である。第2章で提案した測位法には4素子のマイクロフォンアレイが必要で受信機のハードウェアが複雑になる。マイクロフォンアレイとして最小構成の2素子でも測位が可能となれば、小型機器などへの搭載の自由度が高まる。本研究ではこれらの課題について、本質的には音源方向を一意に定めようとするのが原因であると考え。そこで本章では、非同期の音響ビーコンとマイクロフォンアレイを用いる測位法について、マイクロフォン間の相互相関関数を位置尤度とすることで音源方向の検出を不要とする測位法を提案する。これによりマルチパスによる音源方向の誤検出、及び従来は3素子以上のマイクロフォンが必須であった課題を解決し、その測位精度を従来法と比較する [65] [66].

4.2 相互相関関数を尤度として用いる測位の原理

4.2.1 マイクロフォン間の相互相関関数とマイクロフォン位置の関係

まず、測位により求めようとするマイクロフォンアレイの位置と相互相関関数の関係を示す。Fig. 4.1 に示すマイクロフォン i, j で N 点サンプリングした値を示す $1 \times N$ のベクトル

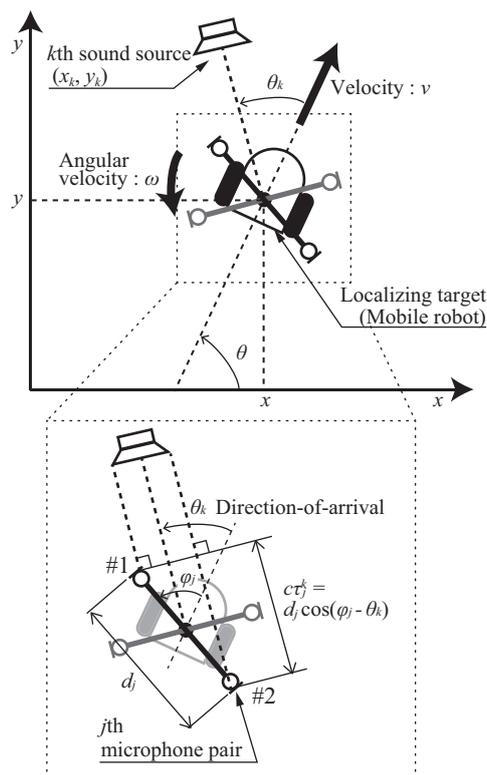


Fig. 4.1: Coordinate system used in the proposed method.

ルをそれぞれ $\mathbf{m}_i, \mathbf{m}_j$ と表すこととし、この信号には音源 k からの信号のみが含まれていることを仮定する ($i, j, k \in \mathbb{N}$)。マイクロフォンのサンプリング周波数を f_s とし、マイクロフォンで時刻 T まで受信した音に関して、これら信号の窓幅 w とした場合の $M = w f_s$ サンプルに関する相互相関関数 $\mathbf{r}_{i,j}^k(\tau)$ は次式の通り求められる。

$$\mathbf{r}_{i,j}^k(\tau) = \sum_{T-w}^T \mathbf{m}_i(t f_s) \mathbf{m}_j((t - \tau) f_s). \quad (4.1)$$

ここで、 $\mathbf{r}_{i,j}^k(\tau)$ は $1 \times M$ のベクトルであり、 t は信号の時刻、 τ はマイクロフォン i, j 間の時間差を表す。また、マイクロフォン i, j と音源 k の位置をそれぞれ $\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j, \mathbf{x}_k$ とする。このとき、マイクロフォン間に現れる音源 k からの音の到来時間差は次式で与えられる。

$$\tau_{i,j}^k = \frac{\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_k\| - \|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_k\|}{c}, \quad (4.2)$$

ここで $\tau_{i,j}^k$ はマイクロフォン i, j で受信された音源 k からの音の到来時間差であり、 c は空間中の音速である。マイクロフォンには音源 k からの直達音のみが受信されていると仮定

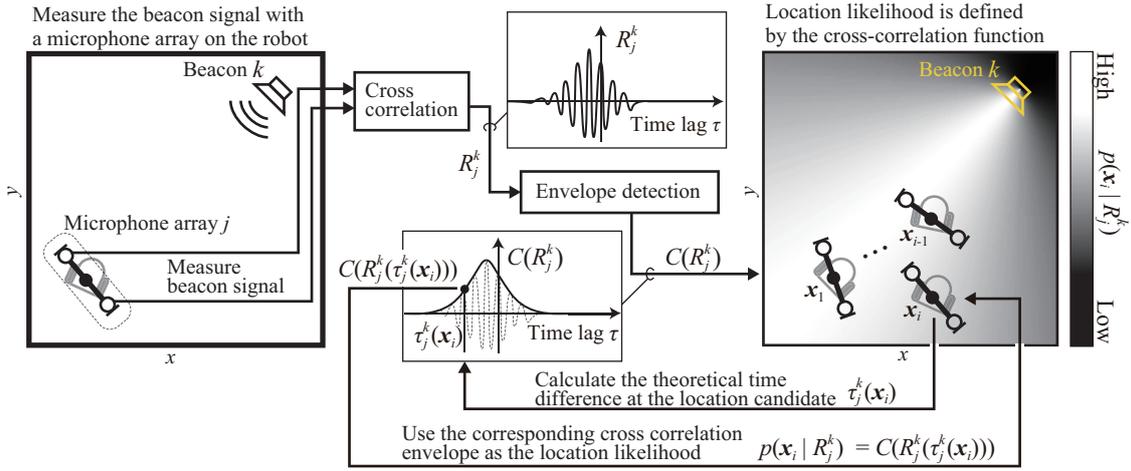


Fig. 4.2: Overview of the proposed likelihood.

すると、 $\tau_{i,j}^k$ k と $r_{i,j}^k(\tau)$ の間には以下の関係が成り立つ。

$$\tau_{i,j}^k = \arg_{\tau} \max r_{i,j}^k(\tau). \quad (4.3)$$

4.2.2 相互相関関数を用いるマルチパスにロバストな位置尤度の定義

測位対象に取り付けたマイクロフォンの位置を \mathbf{x}_i とし、測位対象の位置 \mathbf{x}_r とここからマイクロフォンまでの相対位置 \mathbf{x}_i^r を用いて次式の通り表すこととする。

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{x}_r + \mathbf{x}_i^r, \quad (4.4)$$

通常、マイクロフォンは測位対象に固定されており、 \mathbf{x}_i^r は定数のベクトルとなる。また、すべての音源の位置 \mathbf{x}_k は事前にわかっているものとする。このとき、マイクロフォン間の音の到来時間差 $\tau_{i,j}^k$ は測位対象の位置 \mathbf{x}_r のみの関数 $\tau_{i,j}^k(\mathbf{x}_r)$ として表すことができる。相互相関関数 $r_{i,j}^k(\tau)$ が $\tau = \tau_{i,j}^k(\mathbf{x}_r)$ において最も高い値を示すとすれば、測位対象の位置 \mathbf{x}_r の尤度を $r_{i,j}^k(\tau)$ によって表現することが可能である。本手法では、位置の尤度を以下の関係によって表すものと定義する。

$$p(\mathbf{r}_{i,j}^k | \mathbf{x}_r) \equiv C_{i,j,k} f(\mathbf{r}_{i,j}^k)(\tau_{i,j}^k(\mathbf{x}_r)), \quad (4.5)$$

ここで、 $f(x)$ は x の包絡線をあらわし、 $C_{i,j,k}$ は適当な正規化のための定数項であるとする。Figure 4.2 に提案する尤度の概要を示す。

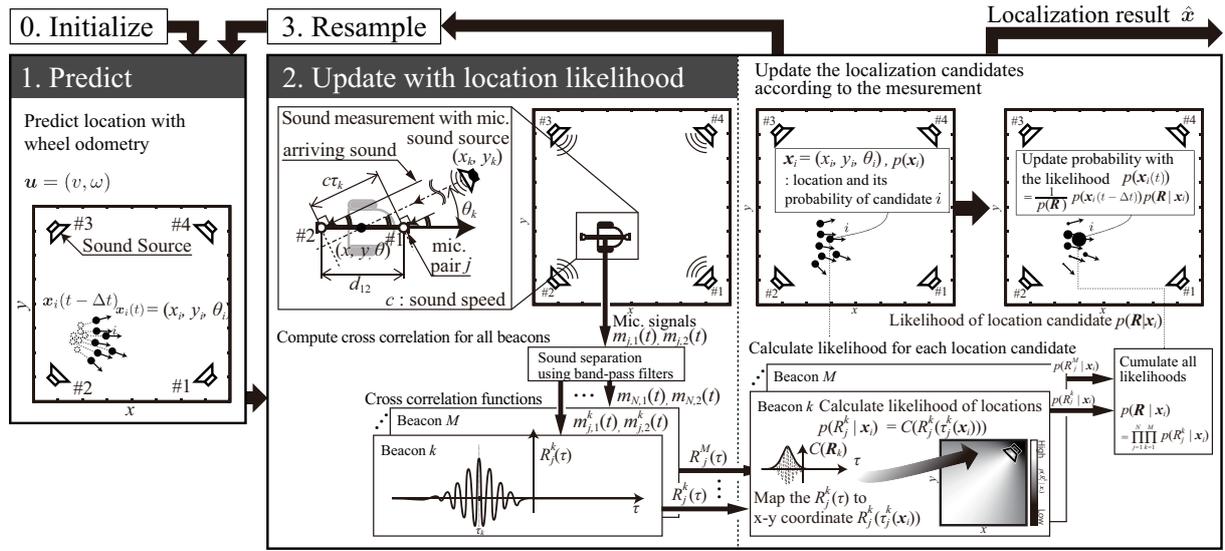


Fig. 4.3: Overview of the proposed method using particle filter.

以上に示す式 (4.5) をすべての音源, すべてのマイクロフォンペアについて計算する. 各音源, 各マイクロフォンペアに関する音の到来時間差を並べたベクトル τ を以下の通り定義する.

$$\tau(\mathbf{x}_r) = \left[\tau_{1,2}^1, \dots, \tau_{1,N_m}^1, \dots, \tau_{N_m, N_m-1}^{N_s} \right]. \quad (4.6)$$

ここで N_m と N_s はそれぞれマイクロフォンの数, 及び音源の数を表し, $N_m, N_s \in \mathbb{N}$ である. マイクロフォンの信号 $\mathbf{M} = [\mathbf{m}_1, \mathbf{m}_2, \dots, \mathbf{m}_N]^T$ から測位対象の位置 \mathbf{x}_r を求める問題は, 確率密度関数 $p(\mathbf{x}_r|\mathbf{M})$ を求めることとして定式化できる. ベイズの定理から, 求めたい確率分布 $p(\mathbf{x}_r|\mathbf{M})$ は次式の通り表すことができる.

$$p(\mathbf{x}_r|\mathbf{M}) \sim p(\mathbf{M}|\mathbf{x}_r)p(\mathbf{x}_r). \quad (4.7)$$

測位対象の位置に関する事前確率分布 $p(\mathbf{x}_r)$ はたとえば一様分布とする, もしくは直前の測位結果を用いることとすれば, この問題で計算する必要があるのは $p(\mathbf{M}|\mathbf{x}_r)$ である. しかしながら, \mathbf{M} 自体は測位結果と相関が無いためこの確率分布をマイクロフォンの録音信号 \mathbf{M} により直接定められない. これまでに提案されている従来法はマイクロフォン間の音の到来時間差 $\hat{\tau}$ を式 (4.3) により検出した上で, 正規分布などを仮定して $p(\hat{\tau}|\mathbf{x}_r)$ を求め, 測位を行っている. この方法では $p(\mathbf{M}|\mathbf{x}_r)$ を \mathbf{M} により表現する必要がないが, 時間差 $\hat{\tau}$ の検出が強い反射波などにより失敗する場合がある. このような誤検出が起これば, これが正しいと仮定して測位を行うため従来法では大きな測位誤差が発生し, 外乱に弱い測位手法となっている.

提案手法は M から $\hat{\tau}$ を検出する過程で誤検出が発生していることに着目し、式 (4.5) により定義した尤度を用いて M すべてを位置推定へ反映させる。これにより、原理的に誤検出が発生しづらく、ロバストな測位が期待できる。ここで $\mathbf{R}(M)$ を次式に示すとおりすべてのマイクロフォンの組み合わせに関して相互相関関数を並べた行列とする。

$$\mathbf{R}(M) = \left[r_{1,2}^1, \dots, r_{1,N_m}^1, \dots, r_{N_m, N_m-1}^{N_s} \right]^T. \quad (4.8)$$

この $\mathbf{R}(M)$ を用いて、測位の計算式式 (4.7) は次式の通り表すことができる。

$$p(\mathbf{x}_r | M) \sim p_{\mathbf{R}}(M | \mathbf{x}_r) p(\mathbf{x}_r), \quad (4.9)$$

$$p_{\mathbf{R}}(M | \mathbf{x}_r) \equiv p(\mathbf{R}(M) | \tau(\mathbf{x}_r)). \quad (4.10)$$

また、尤度 $p(\mathbf{R}(M) | \tau(\mathbf{x}_r))$ は相互相関関数により表現することができる。

$$p_{\mathbf{R}}(M | \mathbf{x}_r) = p(\mathbf{R}(M) | \tau(\mathbf{x}_r)) \quad (4.11)$$

$$\equiv C \prod_{i,j,k} p(r_{i,j}^k | \mathbf{x}_r) \quad (4.12)$$

ここで C は式 (4.12) を確率分布とするための適当な正規化定数である。式 (4.12) と事前確率密度関数 $p(\mathbf{x}_r)$ から、提案手法による測位結果 $\hat{\mathbf{x}}$ は次式の通り得られる。

$$\hat{\mathbf{x}} = \frac{p_{\mathbf{R}}(M | \mathbf{x}_r) p(\mathbf{x}_r)}{p_{\mathbf{R}}(M)}. \quad (4.13)$$

4.2.3 パーティクルフィルタを用いる測位法

提案手法は式 (4.13) と移動ロボットの車輪回転数情報を統合するため、パーティクルフィルタを用いる。概要を図 4.3 に示す。移動ロボットは 2 次元空間中を移動するものと仮定し、移動ロボットの位置 \mathbf{x}_r はロボットの位置 (x_r, y_r) と姿勢角 θ_r により $\mathbf{x}_r = [x_r, y_r, \theta_r]^T$ と表すものとする。また、移動ロボットの速度 v と角速度 ω をベクトル $\mathbf{u} = [v, \omega]^T$ とし表すものとする。このとき、時刻 t における移動ロボットの位置 $\mathbf{x}_r(t)$ は \mathbf{u} と以前の位

置 $\mathbf{x}_r(t - \Delta t)$ から次式の通り求められる。

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_r(t) &= \mathbf{f}(\mathbf{x}_r(t - \Delta t), \mathbf{u}), \\ &= \begin{bmatrix} x_r(t - \Delta t) \\ y_r(t - \Delta t) \\ \theta_r(t - \Delta t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (v + \alpha)\Delta t \cos \theta_r \\ (v + \alpha)\Delta t \sin \theta_r \\ (\omega + \beta)\Delta t + \gamma \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (4.14)$$

ここで、 α, β, γ はそれぞれ速度、角速度、角度の誤差を表す。これらの誤差は各々平均0、標準偏差が $\sigma_\alpha, \sigma_\beta, \sigma_\gamma$ の正規分布に従うものとする。提案手法はパーティクルフィルタに用いる N サンプルのパーティクルについて、式 (4.14) を用いて位置を予測する。パーティクルフィルタの観測ステップでは各測位候補 \mathbf{x}_{pred} を式 (4.12) に従って計算し、各位置の尤度 l_{pred} を求める。測位結果 $\hat{\mathbf{x}}$ は式 (4.13) に示す加重平均として求められる。

4.3 実験

4.3.1 マイクロフォンアレイと移動ロボットを用いる測位評価

実験では移動ロボット (iRobot Create, iRobot) を屋内で最大速度 0.25 m/s で動作させ、その測位精度を2素子・4素子のマイクロフォンアレイを用いる手法で比較した。移動ロボットには4素子のマイクロフォンを半径 25 cm の円状に等間隔で配置した。マイクロフォンの信号はADコンバータ (USB-6212, National Instruments) を使用し、サンプリング周波数 100 kHz でPCへ取得した。移動ロボットの車輪回転数は 5 Hz で計測を行ない、これに合わせて提案手法の測位を行った。相互相関関数の窓幅はビーコンの信号長と同じ 0.1 s とした。移動ロボットのマイクロフォンには各ビーコンの音が同時に入るため、バンドパスフィルタを用いてこれらを分離した。位置の真値は18台のカメラ (Prime 41, OptiTrack) 及び位置計算ソフトウェア (Motive body, OptiTrack) から成るモーションキャプチャシステムを用いて 120 Hz で計測を行った。パーティクルフィルタの粒子数は 1000、並進速度・角速度の標準偏差はそれぞれ 0.3 m/s, 0.2 rad/s とした。実験条件は第2章に示す3条件で行った。実験は同じ経路に対して10回行った。

パーティクルフィルタでは、計算に用いるパーティクル数が測位精度と計算量に影響する。パーティクル数によるこれらへの影響を検討するため、パーティクル数を1から1000まで変化させ各々の測位精度と計算時間を計測した。測位計算はデスクトップPC(CPU:

Table 4.1: Condition of experiments.

Sampling frequency of microphones	100 kHz
Sound characteristics	
Sound type	Linear up chirp
Sweeping time	0.1 s
Sweeping frequencies	
Sound 1	12 – 14 (kHz)
Sound 2	14.5 – 16.5 (kHz)
Sound 3	17 – 19 (kHz)
Sound 4	19.5 – 21.5 (kHz)

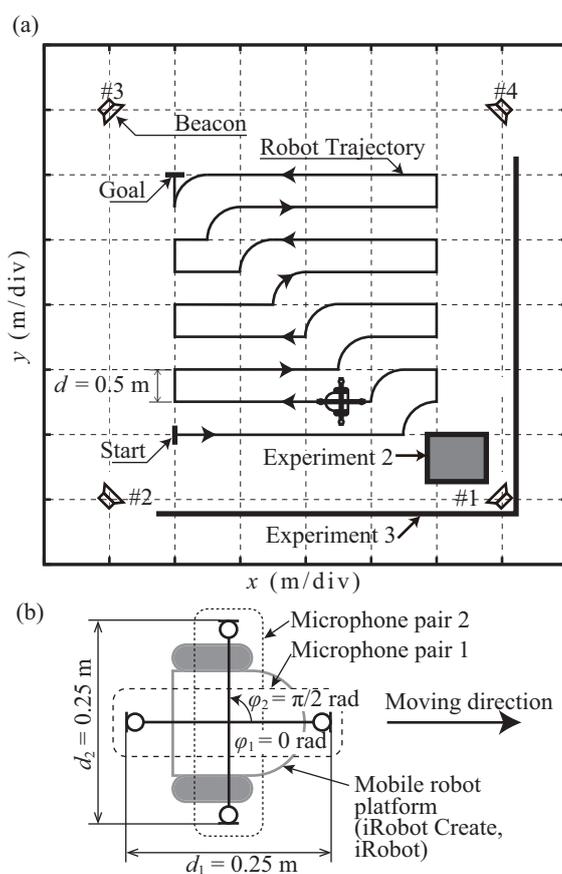


Fig. 4.4: Experimental setup of each condition.

Intel Core i5-4670 (3.4 GHz); memory: 16 GB; Operating System: Microsoft Windows 10) に行った。

4.3.2 実験環境における壁面の有無によるマルチパス

実験環境におけるマルチパス・残響の定量的な評価のため、残響時間 (RT60) を計測した。計測はマイクロフォン (Type 4939-A-011; B&K) を Fig. 4.4 のスタート位置に設置し、その信号をアンプ (Type 2690-0S2; B&K) を介して収録した。音源としてスピーカを音源 #1 の位置に設置した。インパルス応答計測には周波数 0–50 kHz、信号長 5 s の log 掃引正弦波を用いた。上記信号は AD/DA 変換器 (NI USB-6221 BNC; National Instruments) からサンプリング周波数 100 kHz で生成した。当該信号をカットオフ周波数 50 kHz の 1 次ローパスフィルタを通過させた後、オーディオアンプ (AP05; Fostex) を通じてスピーカへ入力した。スピーカから発した信号はマイクロフォンを用いてサンプリング周波数 100 kHz で収録した。信号対ノイズ比を RT60 計測に十分に大きくするため、100 回の計測を行い同期加算した。エネルギー減衰曲線は計測により求めたインパルス応答からシュレダー積分により求めた。RT60 は上記曲線のうち、時刻 0 における大きさを基準として -10 dB から -30 dB まで減衰する時間の 3 倍として求めた。以上の手順を Fig. 4.4 に示す壁面の有無それぞれについて計測した。

計測により求めたインパルス応答およびエネルギー減衰曲線を Fig. 4.5 に示す。RT60 は壁面がない場合 1.62 s、壁面がある場合は 1.51 s であった。これら 2 条件で 0.1 s 程度異なる値ではあるものの、両条件で概ね同様の残響特性であると考えられる。一方で、Fig. 4.5(c)(d) に見られる反射は大きく異なる。Figure 4.5(c) に示す壁面がない場合のインパルス応答には明確な 2 つのピークが確認できる。これらのピークは音源からの直達音および建物のうち最も近い壁からの反射と考えられる。これに対し、Fig. 4.5(d) にはより多くのピークが確認できる。これらのピークは音源知覚に設置した壁による影響であり、これら直達音以外のピークによって音源方向の誤検出が発生する。

4.4 結果・考察

4.4.1 遮蔽物や壁面のない場合

条件 1 における測位結果を Fig. 4.6、測位誤差の累積分布関数を Fig. 4.7 に示す。測位結果 Fig. 4.6(a) から、いずれの測位法も測位結果が発散することなく即位できていることが確認できる。Figure 4.7(a) に示す箱ひげ図から、比較した各種法はすべて測位誤差 1 m 以内程度の測位精度であることがわかる。従来法として比較した音源方向を確定的に検

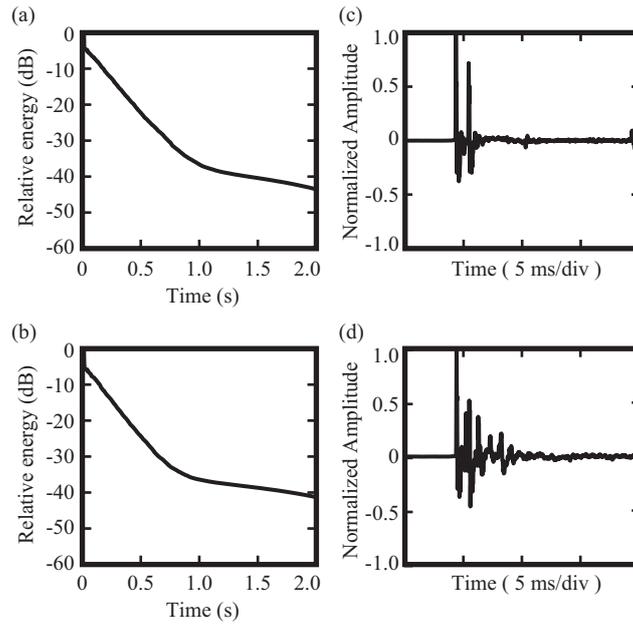


Fig. 4.5: Experimental condition of reverberation and reflection. (a) Energy decay curve without the wall, (b) energy decay curve with the wall, (c) close-up of the impulse response without the wall, (d) close-up of the impulse response with the wall.

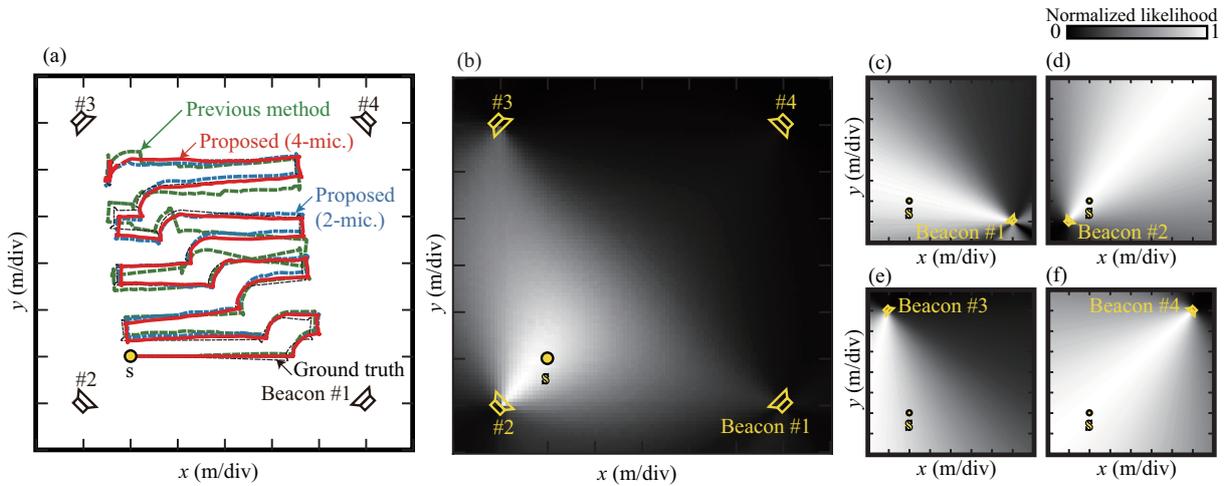


Fig. 4.6: An example of the localization result of each method in experiment 1. (a) Localization results for each method. (b) An example of the location likelihood $p(\mathbf{x}_i(t)|\mathbf{R})$ at the point s . Panel (c) shows the location likelihood at the point s only with the beacon #1 $p(\mathbf{x}_i(t)|R_1^1)p(\mathbf{x}_i(t)|R_2^1)$, (d) shows that with the beacon #2 $p(\mathbf{x}_i(t)|R_1^2)p(\mathbf{x}_i(t)|R_2^2)$, (e) shows that With the beacon #3 $p(\mathbf{x}_i(t)|R_1^3)p(\mathbf{x}_i(t)|R_2^3)$, and (f) shows that with the beacon #4 $p(\mathbf{x}_i(t)|R_1^4)p(\mathbf{x}_i(t)|R_2^4)$.

出する測位法では比較的測位誤差が大きく、とくに外れ値が大きい。Fig. 4.7(b)に示す累積分布関数から、90%誤差は2素子、4素子のマイクロフォンを用いる提案法でそれぞれ0.21 m, 0.19 mであり、従来法では0.23 mであった。従来法ではFig. 4.6(a)に確認でき

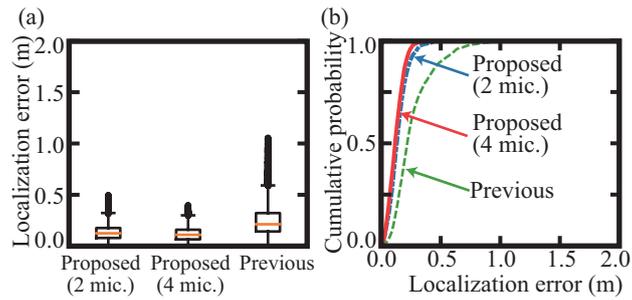


Fig. 4.7: Localization error of experiment 1. (a) Box plot of the localization error. (b) Cumulative distribution functions of the localization error.

る通り、測位結果が不連続に変化する場合がある。これは音源方向の誤検出により大きな測位誤差が突発的に発生することによると考えられる。これに対し、提案法では外れ値は少なく、不連続な測位結果の変化が少ない。提案法では確定的な音源方向推定を行っておらず、これによって相互相関関数の最大値が実際の音源方向と一致しない場合にも測位が可能である。提案法のうち異なる素子数のマイクロフォンを使用した場合を比較すると、2素子に比べ4素子の場合のほうが測位精度が良いことが確認できる。これは4素子のマイクロフォンを用いる場合には虚像が発生せず、冗長な情報を得られているため反射にロバストな測位が可能であると考えられる。2素子のマイクロフォンのみを用いる測位では4素子を用いる提案法に比べ測位誤差は大きいものの、従来法では2素子での測位は不可能であり、提案法ではより少ないマイクロフォンで従来法と同等以上の測位精度が達成可能である。

図中に s で示すスタート地点各位置の尤度を Figs. 4.6(c)-(f) に示す。提案法の測位精度はビーコンの周波数帯域幅に依存する。周波数帯域幅が f_b Hz のチャープ信号について、その自己相関関数のメインローブの幅は $1/f_b$ Hz であることが知られている [67]。本研究では、すべてのビーコンについて帯域幅を $f_b=2$ kHz とした。これに対応する自己相関関数のメインローブの幅は 0.5 ms である。他方、実験で用いた素子間距離 25 cm のマイクロフォンアレイでは、素子間の音の伝搬時間差の最大値は音速 c を用いて $d_j/c = \pm 0.76$ ms であり、これが音の到来方向 ± 90 deg に相当する。音の到来時間差のうち、メインローブの大きさはこれに対して $0.5 \text{ ms} / 0.76 \text{ ms} = 66\%$ の広がりを持つ。伝搬時間差と音源方向の関係は三角関数で表される非線形な関係であるが、目安としておおむね ± 59 deg の広がりを持つことが想定できる。これを Figs. 4.6(c)-(f) で確認すると、各音源の方向に対し概ね上記角度の範囲で尤度が高いことが確認できる。これ以上に広い範囲で尤度が高い理由については、Fig. 4.5 に示すとおり残響によりインパルス応答が広がることによると考え

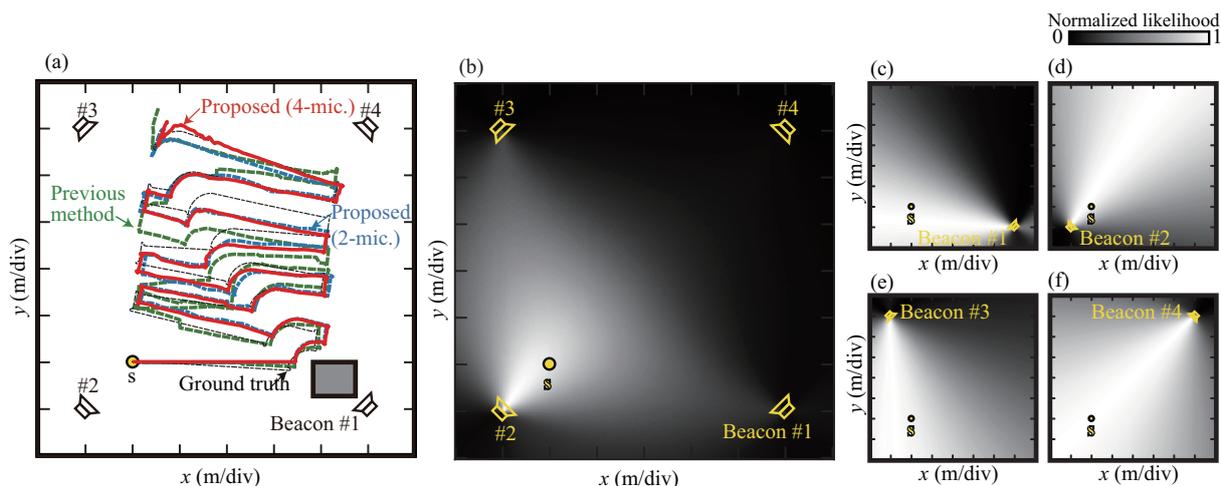


Fig. 4.8: An example of the localization result of each method in experiment 2. (a) Localization results for each method. (b) An example of the location likelihood $p(\mathbf{x}_i(t)|\mathbf{R})$ at the point s . Panel (c) shows the location likelihood at the point s only with the beacon #1 $p(\mathbf{x}_i(t)|R_1^1)p(\mathbf{x}_i(t)|R_2^1)$, (d) shows that with the beacon #2 $p(\mathbf{x}_i(t)|R_1^2)p(\mathbf{x}_i(t)|R_2^2)$, (e) shows that With the beacon #3 $p(\mathbf{x}_i(t)|R_1^3)p(\mathbf{x}_i(t)|R_2^3)$, and (f) shows that with the beacon #4 $p(\mathbf{x}_i(t)|R_1^4)p(\mathbf{x}_i(t)|R_2^4)$.

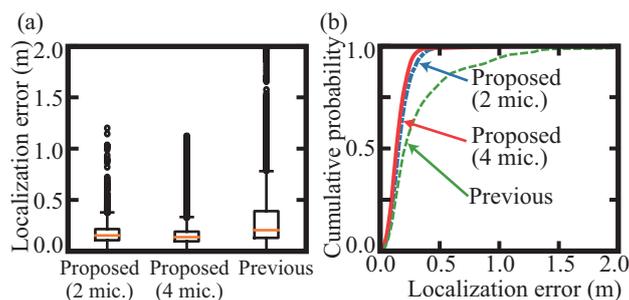


Fig. 4.9: Localization error of experiment 2. (a) Box plot of the localization error. (b) Cumulative distribution functions of the localization error.

られる。

4.4.2 遮蔽物がある場合

条件2における測位結果の例を Fig. 4.8 に、各測位法による測位誤差を Fig. 4.9 に示す。測位結果の誤差はすべての測位法で条件1にくらべ大きく、音源#1の前に設置した障害物による見通し外の影響が確認できる。Figure 4.9(a)から、従来法の測位誤差の内外れ値の大きさが条件1の1.1 mから1.4 mへ増加した。提案法も同様に測位誤差が条件1にくらべ増加したものの、いずれも従来法の外れ値にくらべ小さい。Fig. 4.9(b)に示す累積分布関数から、90%誤差は2素子、4素子のマイクロフォンを用いる提案法でそれぞれ0.23 m,

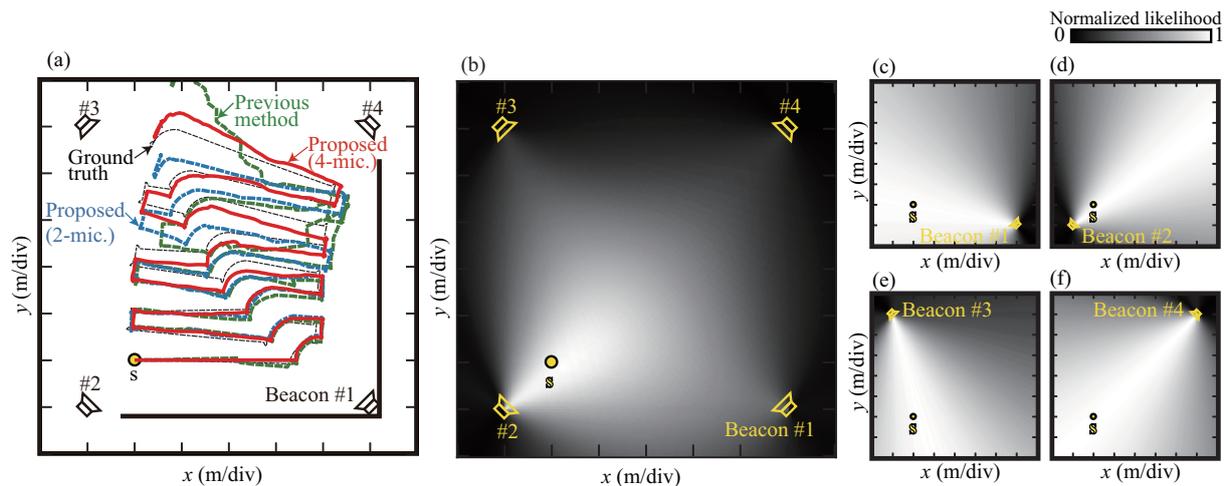


Fig. 4.10: An example of the localization result of each method in experiment 3. (a) Localization results for each method. (b) An example of the location likelihood $p(x_i(t)|R)$ at the point s . Panel (c) shows the location likelihood at the point s only with the beacon #1 $p(x_i(t)|R_1^1)p(x_i(t)|R_2^1)$, (d) shows that with the beacon #2 $p(x_i(t)|R_1^2)p(x_i(t)|R_2^2)$, (e) shows that With the beacon #3 $p(x_i(t)|R_1^3)p(x_i(t)|R_2^3)$, and (f) shows that with the beacon #4 $p(x_i(t)|R_1^4)p(x_i(t)|R_2^4)$.

0.19 m であり，従来法では 0.31 m であった．見通し外の影響がある場合，第 2 章で示したように確定的な音源方向推定では音源方向を正しく推定できず，何らかの手法でその正しさを評価する必要があった．従来法では 2 組のマイクロフォンアレイで計測した伝搬時間差について幾何学的な関係からその不一致を計算，これを不正確さの指標として用いていた [44]．提案法ではこのような特別な処理や閾値の設定などを行わずとも，見通し街の場合でも同等の測位精度を達成している．特に，2 素子のマイクロフォンを用いる場合には従来法の幾何学的な関係は計算できないが，提案法では 2 素子であっても見通し外の影響は従来法と同等程度に抑えられている．これらは相互相関関数の最大値のみならず，その他の値も推定に用いてあり得る位置を検討するためであると考えられる．測位結果の例を Fig. 4.9(a) に，Figs. 4.8(b)-(f) に図中 s の位置における尤度の分布を示す．従来法は条件 1 と同様に不連続な測位結果となった箇所がある．

4.4.3 壁面による音のマルチパスがある場合

条件 3 における測位結果の例を Fig. 4.10 に各測位法による測位誤差を Fig. 4.11 に示す．条件 1 の計測結果 Fig. 4.7(a) に比べ，本条件での測位誤差が大きく増加していることがわかる．これは音源#1 付近に設置した壁面による影響である．従来法では特に測位誤差の外れ値が条件 1 では 1.1 m 程度であったのに対し，本条件では約 2 m である．また，従

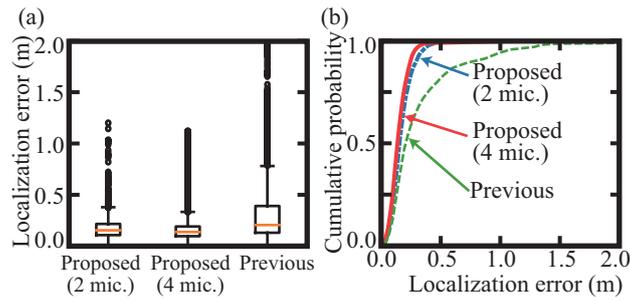


Fig. 4.11: Localization error of experiment 3. (a) Box plot of the localization error. (b) Cumulative distribution functions of the localization error.

来法の90%誤差は条件1の0.23 mから0.49 mへと増加した。これに対し提案法では、条件1の場合と比較した測位誤差の外れ値はマイクロフォンを2素子を用いる場合0.7 mから1.3 mへ、4素子を用いる場合は0.5 mから1.2 mへと増加した。一方で、90%誤差は2素子を用いる場合0.21 mから0.23 mへ、4素子を用いる場合は0.19 mから0.23 mへと変化したのみである。Figure 4.10(a)に測位結果の一例を示す。従来法では特に経路の終端付近で測位結果が発散しているのに対し、提案法では条件1と同等の測位が可能である。また、同図内のsで示した位置における尤度の分布をFigs. 4.10(b)に示す。条件1, 2にくらべ、条件3では尤度の高い位置が広い範囲に分布していることがわかる。これは音源#1の背後に設置した壁による反射の影響であると考えられる。壁面より反射して到来する音がマイクロフォンアレイに入射する場合、各反射音は直達音と高い相関をもつことから、相互相関関数に多数のピークが生じることになる。従来法ではこの影響を考慮せず、最も高いピークを生じる時刻を音源方向に対応する時間差と仮定したため、測位誤差が生じる。提案法では相互相関関数の最大値以外にも積極的に用いており、Fig. 4.10(c)に示すとおり条件1のFig. 4.6(c)にくらべ広い範囲で尤度が高く音源方向を誤りやすい条件でも反射にロバストな測位が可能である。

4.5 提案法の測位誤差と計算時間の関係

提案法の測位誤差は計算に用いるパーティクル数によって変化する。多数のパーティクルを用いて測位計算を行うと測位精度と反射に対するロバスト性は向上するものの、これに対応して計算時間が多くなる。これらについて、マイクロフォンアレイのうち2素子、4素子を用いる測位の測位誤差とパーティクル数の関係をそれぞれFigures 4.12(a)-(c), Figs. 4.13(a)-(c)に示す。いずれの結果についても、パーティクル数の増加に伴って測位誤

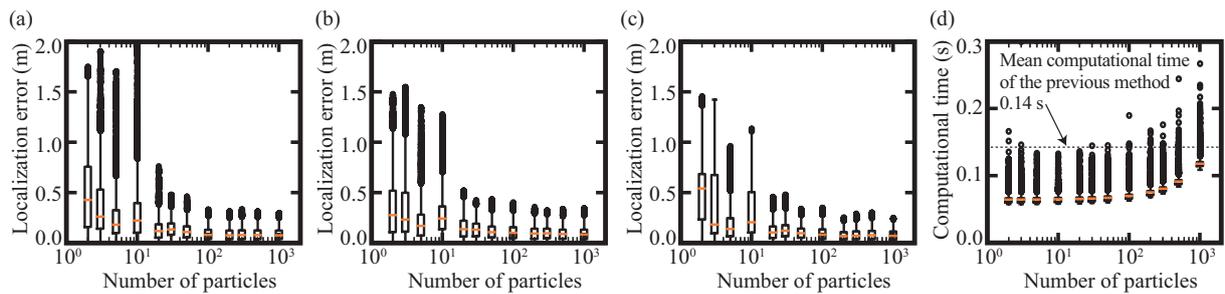


Fig. 4.12: Calculation time and localization error for different numbers of particles with two microphones. (a) Relationship between calculation time and number of particles. Panels (b), (c) and (d) depict the relationship between the localization error and number of particles in experiment 1, 2 and 3, respectively.

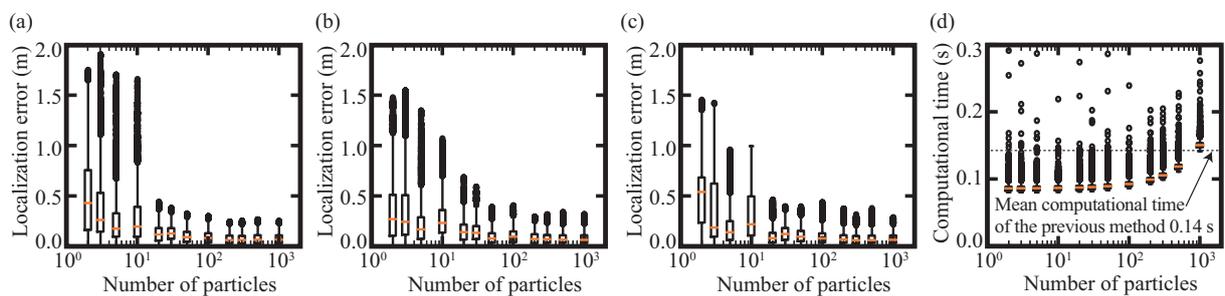


Fig. 4.13: Calculation time and localization error for different numbers of particles with two microphones. (a) Relationship between calculation time and number of particles. Panels (b), (c) and (d) depict the relationship between the localization error and number of particles in experiment 1, 2 and 3, respectively.

差は減少した。尤度の分布を有限個のパーティクルによるサンプルで近似するため、多数のパーティクルを用いるほど尤度の分布をよく表現し、測位精度が向上する。他方、尤度の分布を十分に表現できるパーティクル数がある場合、それ以上のパーティクルがなくとも測位が十分可能である。例えば本実験では、パーティクル数が100を超えると測位誤差が収束していることがわかる。尤度分布はマイクロフォンアレイの構造や音源配置によって異なるものの、パーティクル数による反射に対するロバスト性の変化については本結果から議論できる。パーティクル数が十分多く測位誤差が収束した結果については、提案法による測位の限界を示すと考えられる。前節までの結果はパーティクル数が1000の場合を示しており、測位誤差が十分収束した結果についての議論であり、提案法の限界に関する議論として妥当であるといえる。パーティクル数による計算時間の変化を Figure 4.12(d) 及び Fig. 4.13(d) に示す。測位計算に必要な計算時間はパーティクル数に応じて増加した。計算時間の下限は2素子のマイクロフォンを用いる場合0.05 s、4素子のマイクロフォンを用いる0.08 sであった。計算時間の加減については、主に最も計算量の大きい相互相関関数の計算によって決まっていると考えられる。2素子のマイクロフォンを用いる場合は

1回の相互相関関数計算のみで測位が可能であり、4素子のマイクロフォンを用いる場合に比べ計算量が少ない。計算時間の外れ値については、コンピュータのバックグラウンドプロセスによって生じていると考えられる。パーティクルフィルタのアルゴリズムでは、計算量がパーティクル数により大きくなる。提案法を実時間で実行する場合を考えると、測位計算は測位を行う周期以内の時間で終えなければならない。本実験では測位を5 Hzで行っているため、本計算環境では少なくともパーティクル数が1000までの間は実時間での測位が可能と期待できる。また、従来法の計算量と比較しても、提案法の計算量は同等以下程度で測位することが可能である。これは特に2素子のマイクロフォンを用いる場合に顕著であり、従来法では4素子のマイクロフォンを用いる相互相関関数計算が必須であり、よりロバストな測位精度をより少ない計算量で達成可能である。

4.6 まとめ

本章では非同期の音響ビーコンと2素子のマイクロフォンアレイでも実現可能な測位手法を提案し、その測位精度を4素子のマイクロフォンアレイを用いる測位と比較し考察した。提案手法はマイクロフォン間の相互相関関数を状態変数に応じ参照して尤度計算を行い、マイクロフォンアレイ音源方向が一意に定まらない場合でも測位を可能とした。提案法はパーティクルフィルタを用いて実装し、第2章で行った3条件の実験について提案法を適用し測位精度を比較した。実験では4機の音響ビーコンを正方形の実験領域の4隅に配置し、マイクロフォンアレイを搭載した移動ロボットをこの中で移動させた。障害物等がない場合、従来法では測位誤差の90%誤差は0.39 mであるのに対し、提案法では0.19 mであった。障害物が音源の前にある見通し外の条件では、提案法及び従来法ともに測位精度に大きな変化はなかった。壁面がある場合、障害物等がない場合に比べ従来法では測位誤差が0.49 m程度へと増加した。この条件では反射による測位への影響が顕著であったが、提案法では測位誤差の90%誤差が0.23 mであり、従来法に比べ反射にロバストな測位が可能であることを示した。また、提案法の測位に必要な計算時間についても検討し、本実験で想定した測位には実時間での適用が可能であることを、従来法と比較しても計算量が大きく変わらないことを示した。提案法は反射などで確定的な音源方向推定では精度が劣化する場合でもこれにロバストな測位を行い、かつ2素子という最小構成のマイクロフォンアレイでも非同期音響ビーコンによる測位を可能とする。

Algorithm 1 Localization with the proposed likelihood.

```

1: Define a vector array of location candidates  $\mathbf{x}$ 
2: Define an array of corresponding location probabilities  $\mathbf{p}$ 
3: Define and initialize localization result  $\hat{\mathbf{x}}$ 
4:
5: for each particle  $i$  do
6:   Initialize vector of location  $\mathbf{x}_i$ 
7:   Initialize corresponding location probability  $p_i$ 
8: end for
9:
10: repeat
11:    $\mathbf{m} \leftarrow$  data from microphone pairs
12:   for each sound source  $k$  do
13:      $\mathbf{m}^k \leftarrow$  SeparateSoundSources( $\mathbf{m}$ ,  $k$ )
14:     for each microphone pair  $j$  do
15:        $\mathbf{R}_j^k \leftarrow$  Correlation( $m_{j,1}^k, m_{j,2}^k$ )
16:     end for
17:   end for
18:
19:    $\mathbf{u} \leftarrow$  data from wheel rotation
20:   for each particle  $i$  do
21:      $\mathbf{x}_{\text{pred},i} \leftarrow$  PredictLocation( $\mathbf{x}_i$ ,  $\mathbf{u}$ )
22:      $l_{\text{pred},i} \leftarrow p_i \cdot \text{Likelihood}(\mathbf{x}_{\text{pred},i}, \mathbf{R})$ 
23:   end for
24:   for each particle  $i$  do
25:      $p_i \leftarrow l_{\text{pred},i} / \sum_i l_{\text{pred},i}$ 
26:   end for
27:    $\hat{\mathbf{x}} \leftarrow \sum_i p_i \mathbf{x}_{\text{pred},i}$ 
28:
29:   if  $N_{\text{effec}} < \text{threshold}$  then
30:      $\mathbf{x} \leftarrow$  Resample( $\mathbf{x}_{\text{pred}}, \mathbf{p}$ )
31:   else
32:      $\mathbf{x} \leftarrow \mathbf{x}_{\text{pred}}$ 
33:   end if
34: until localization ends

```

第5章 結 論

本研究では少素子のマイクロフォンアレイと音響ビーコンを用いるロバストな測位法を提案した。第2章では非同期の音響ビーコンと少素子のマイクロフォンアレイを用いて測位を行う原理を示し、その有効性を実験により確認した。提案法では分離可能な音源を複数配置し、これに対して4素子から成るマイクロフォンアレイと車輪回転数を用いて測位を行う。この際、マルチパス等による音源方向の不正確さを、マイクロフォンアレイ素子間の幾何学的関係から評価する手法を提案した。音響ビーコンは周波数帯域幅2 kHzのアップチャープ信号とし、6 m四方の空間の四隅に配置した。測位対象となる移動ロボットでは、移動時の車輪回転数を計測するとともに、これらの音を4素子のマイクロフォンアレイを用いて受信した。実験では条件1としてマルチパス等がない場合、条件2として音響ビーコンのうち1機が遮蔽され見通し外となる場合、条件3として音源の背後に壁面を設置しマルチパスを生じる場合の3条件について行った。その結果、条件1では車輪回転数のみを用いる手法ではy軸が最も大きく平均0.67 m、標準偏差1.5 m程度の測位誤差が発生するのに対し、提案手法では平均0.069 m、標準偏差0.2 m程度の誤差で測位が可能であった。条件2では音源方向の誤差が生じたものの、これに対応する不正確さの評価値が大きくなり測位への影響を抑えた。これにより、見通し外の場合でも条件1に対し大きく測位誤差が生じないことを示した。条件3ではマルチパスによる音源方向の不正確さが生じ、条件1, 2に比べ大きな測位誤差が生じた。音源方向の不正確さ評価についても、マルチパスによる音源方向の誤検出はマイクロフォンアレイの幾何学的関係からは検出できず、他の手法が必要であることを示唆した。以上により、非同期の音響ビーコンと少素子のマイクロフォンアレイを用いる測位の原理と測位が可能であることを示した。

第3章では非同期音響ビーコンの配置及び信号設計を行った。音響ビーコンの配置及び受信機の位置関係により、同じ音源方向誤差から生じる測位結果の誤差は変化する。この関係を定量化するため、音響ビーコン及び受信機の幾何学的関係の条件数を定義した。上記関係は非線形であることから、この関係式のヤコビアンについて条件数を計算し、これによって音源配置の評価を試みた。条件数の評価はシミュレーションによって行い、一定の音源位置の誤差、音源方向の誤差を与えた場合の測位誤差について条件数との比較を

行った。その結果、測位誤差と条件数はよく対応しており、これによって音源配置の評価が可能であることを示した。次に、音源方向を用いる測位でビーコンから発する信号について、擬似乱数系列を用いる場合の設計パラメータによる音源方向推定および測位への影響を検討した。シミュレーションでは測位に最小限必要である3機の音響ビーコンを設置し、その周辺を移動ロボットで走行させた。このとき音響ビーコンが発する信号について、変調のキャリア周波数、チップレート及びM系列信号の次数を変化させた。その結果、M系列符号を用いる場合、チップレートとキャリア周波数が音源方向推定に影響を与え、これらを適切に設定することで測位が可能であることを示した。また、擬似乱数系列を用いる場合、ドップラシフトが生じると送受信信号間の相関がなくなり検出が難しくなる。移動ロボット程度の測位が可能であるかを検討するため、音源方向推定のためのマイクロフォン間伝搬時間推定を対象として異なる変調のパラメータにおけるドップラシフトの影響を検討し、相互相関関数を用いる伝搬時間の正確さの評価指標を提案した。その結果、相互相関関数の最大値対実効値比を用いて伝搬時間の不正確さを評価できること、チップレートとキャリア周波数を適切に設定することで2 m/s以上の速度でも伝搬時間計測が可能であることを示した。

第4章ではマイクロフォン間の相互相関関数を位置の尤度として用いる測位法を提案した。非同期の音響ビーコンと2素子のマイクロフォンアレイを用いる測位手法について、その測位精度を4素子のマイクロフォンアレイを用いる測位と比較し考察した。提案法は測位結果の候補位置で観測されるべき音の到来時間差に対応する時刻の相互相関値を尤度として用いることで、音源方向を一意に定める必要のない測位を実現した。提案法は第2章で示したのと同じ実験により音響測位法と比較した。その結果、遮蔽物や顕著なマルチパスがない場合、4素子のマイクロフォンを用いる従来法は90%誤差が0.23 mであったのに対し、4素子のマイクロフォンを用いる提案法は0.19 m、2素子のみを用いる場合でも0.21 mで測位が可能であることを確認した。次に、遮蔽物により見通し外の音源が存在する場合、いずれの測位法も外れ値が大きくなる傾向が見られたものの、90%誤差に変化はなかった。従来法では4素子のマイクロフォンの幾何学的関係を用いて音の正確性を評価したためであるのに対し、提案法はこのような特殊な処理をせずとも遮蔽に対し同等のロバスト性を有していることを確認した。また、従来法を適用できない2素子のマイクロフォンのみを用いる場合でも同等以上の測位精度及びロバスト性を達成できることを確認した。さらに、顕著なマルチパスがある場合、従来法では幾何学的関係から正確さを評価できず90%誤差が0.49 mとなった一方、提案法は2素子のマイクロフォンを用い

る場合 0.23 m, 4 素子のマイクロフォンを用いる場合 0.23 m とマルチパスに対するロバスト性を示した。また、提案法はパーティクル数を変化させることで任意の計算量で実行可能であることから、計算量と測位精度の関係について考察した。その結果、本実験の条件ではパーティクル数が 100 程度で測位誤差が収束し、実時間で実行可能な計算量であることを確認した。以上から、提案手法はマイクロフォン間の相互相関関数を状態変数に応じ参照して尤度計算を行い、音源方向が一意に定まらない場合でも測位可能であることを示した。また、強い反射波のある環境、及び音響ビーコンが遮蔽された場合においても、従来法に比べ測位誤差に対する影響が少なくロバストな測位が可能であることを示した。

以上より、本研究では少素子のマイクロホンアレイと非同期の音響ビーコンを用いるマルチパスにロバストな屋内測位法を確立した。本研究の成果は大規模地下空間など全ビーコンの時刻同期が困難な空間における高精度測位へ貢献するほか、非同期の音響ビーコンと 2 素子のマイクロフォンのみを用いて小型の環境センサなど計測機器の位置推定も可能となる。本研究で提案した、伝搬時間を確率密度関数で表現し位置尤度を定義する手法は音源方向を用いる測位以外にも、到来時間、到来時間差を用いる音響測位へも適用可能である。これらについてもマルチパスにロバストな測位を実現可能であると期待できる。また、本研究では媒体を音波に限定して提案法を示したが、提案法の原理は媒体によらないため、UWB や Wi-Fi Round-Trip TOA 等の電波を用いる測位法におけるマルチパス対策にも効果が期待できる。現在理想的な環境ではセンチメートルオーダの測位が可能な UWB についても、シビアなマルチパスが存在する環境における安定した測位などへと貢献できる可能性がある。

謝 辞

本研究の実施にあたり筑波大学システム情報系 教授 水谷孝一先生には、指導教員として研究内容や論文発表、その他多方面について多くのご指導をいただきました。社会人博士となって以降は遠隔地から主にメール等でのご連絡になりましたが、昼夜を問わずご指導頂き大変ありがとうございました。研究者としての覚悟を持つとともに、2019年3月の博士（人間情報学）の学位取得に続き、二度目の博士号取得が可能であったのは、ひとえに先生に頂いた指導のおかげと感じております。

筑波大学システム情報系 准教授 若槻尚斗先生には研究の詳細に関する議論や査読対応の方針、論文執筆等にて多くのご指導・ご助言をいただきました。

筑波大学システム情報系 准教授 海老原格先生には研究内容に加え、投稿すべき雑誌の推薦や英文校正などご指導いただきました。

筑波大学システム情報系 助教 前田祐佳先生には研究の立脚すべき基礎や解析方法の妥当性などご指導いただきました。

筑波大学システム情報系 助教 善甫啓一先生には、測位やアレイ信号処理、その他社会実装へむけた議論などを通じご指導いただきました。

博士審査においては、副査として筑波大学システム情報系 准教授 庄野和宏先生、防衛大学校 教授 森下久先生にご指導をいただきました。本研究の意義や信号処理の妥当性、論文上の不正確な表現など、多くのご指摘を頂き研究の向上につながるとともに、今後の研究においても考えるべき視点を頂きました。

筑波大学音響システム研究室では、年に数回しか研究室に現れない不良学生の私にも、学生の皆様には暖かく接していただきました。昨年までは後輩と思っていましたが、今年から博士課程の先輩であることに気づいた岩谷氏、味藤氏、糸井川氏、佐野氏には、博士論文提出までの過程で多くの支援をいただきました。遠隔地からでも滞りなく手続きなどが行えたのは、期日確認などを共に行ってくれた皆さんのおかげと感じています。博士（工学）取得へ向けた課程入学は2019年度ですが、本研究自体は2014年ごろから行ってきました。この間には、野呂瀬洋子博士、黒山喬允博士、茂木貴弘博士、川岸卓司博士、青柳将史博士、角間孝一博士、安立隆陽博士、藤田佑樹氏、小林彰人氏、青木拓也氏をは

じめとする皆様に多くのご指導を頂いてきました。特に川岸卓司博士には本研究の開始時から、実験系構築・実施・解析など多くのお力添えを頂きました。黒山喬允博士には学生時代のみならず、社会人になってからも大変お世話になってきました。また、博士課程の同期として宮本隆典博士、中林大樹博士とは研究の悩みを共有するなど勇気づけられました。特に宮本隆典博士とは2度の博士課程ともに同期として学ぶという稀有な体験をさせていただき、自身のモチベーションにもなりました。紙面の関係からここに記載できなかった皆様にも、研究生活を通じて公私ともに非常に濃い時間を過ごさせていただきました。この場を借りてお礼申し上げます。

筑波大学システム情報エリア支援室長石濱様には、博士課程進学及び博士号取得など多方面にて多大なるお力添えを頂きました、大変ありがとうございました。

岐阜工業高等専門学校の方には、在職しながらの博士取得について機会をいただきましたこと深く感謝申し上げます。

最後になりますが、博士課程へ進むことを快諾し支えてくれた家族に感謝します。

参考文献

- [1] Robert J. Danchik. Navy Navigation Satellite System (Transit). *Johns Hopkins APL Technical Digest (Applied Physics Laboratory)*, Vol. 5, No. 4, pp. 323–329, 1984.
- [2] Pratap Misra and Per Enge. 精説 GPS. Ganga-Jamuna Press, 2006.
- [3] Masayuki Murata, Dragan Ahmetovic, Daisuke Sato, Hironobu Takagi, Kris M. Kitani, and Chieko Asakawa. Smartphone-based Indoor Localization for Blind Navigation across Building Complexes. In *2018 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications, PerCom 2018*, pp. 1–10, 2018.
- [4] 村上智彦, 瀬下仁志, 近藤亘, 稲葉智, 高石光章, 槍野目真士, 中村慎之介. 成田国際空港における快適性向上に向けた取り組み —高精度屋内地図と地磁気測位を活用しお客様の円滑な移動を支援. *NTT 技術ジャーナル*, Vol. 12, pp. 23–26, 2018.
- [5] Anna Syberfeldt, Mikael Ayani, Magnus Holm, Lihui Wang, and Rodney Lindgren-Brewster. Localizing operators in the smart factory: A review of existing techniques and systems. In *International Symposium on Flexible Automation, ISFA 2016*, pp. 179–185, 2016.
- [6] Takeshi Kurata, Masakatsu Kouroggi, Takashi Okuma, Tomoya Ishikawa, Ryoko Ueoka, Ryuhei Tenmoku, and Koji Makita. Human-Behavior Sensing and Visualization for Service Quality Control. In *Proceedings of CSCW 2012 Workshop: Exploring collaboration in challenging environments: From the car to the factory and beyond*, No. 1, pp. 4–7, 2012.
- [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)*, pp. 1–4, 2016.

- [8] T. Arai, Y. Chida, Y. Okada, and K. Zempo. Sensor network to measure MAAI on value co-creation process: feasibility study of MAAI optimization on customer service. In *Proceedings of the 2019 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing and Proceedings of the 2019*, pp. 1–4, 2019.
- [9] Soo Cheol Kim, Young Sik Jeong, and Sang Oh Park. RFID-based indoor location tracking to ensure the safety of the elderly in smart home environments. *Personal and Ubiquitous Computing*, Vol. 17, No. 8, pp. 1699–1707, 2013.
- [10] Luca Mainetti, Luigi Patrono, Andrea Secco, and Ilaria Sergi. An IoT-aware AAL system for elderly people. In *2016 International Multidisciplinary Conference on Computer and Energy Science, SpliTech 2016*, p. 6 pages, 2016.
- [11] Ismail Güvenç and Chia Chin Chong. A survey on TOA based wireless localization and NLOS mitigation techniques. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, Vol. 11, No. 3, pp. 107–124, 2009.
- [12] Felis Dwiyasa and Meng-hiot Lim. A Survey of Problems and Approaches in Wireless-based Indoor Positioning. In *Proceedings of the 7th International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, IPIN2016*, p. 113 (8 pages), 2016.
- [13] Ali Yassin, Youssef Nasser, Mariette Awad, Ahmed Al-Dubai, Ran Liu, Chau Yuen, Ronald Raulefs, and Elias Aboutanios. Recent Advances in Indoor Localization: A Survey on Theoretical Approaches and Applications. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, Vol. 19, No. 2, pp. 1327–1346, 2017.
- [14] Sebastian Thrun, Wolfram Burgard, and Dieter Fox. *Probabilistic robotics*. MIT Press, 2006.
- [15] Takafumi Taketomi, Hideaki Uchiyama, and Sei Ikeda. Visual SLAM algorithms: a survey from 2010 to 2016. *IPSN Transactions on Computer Vision and Applications*, Vol. 9, No. 16, pp. 1–11, 2017.
- [16] Antonio R.Jiménez Ruiz, Fernando Seco Granja, J. Carlos Prieto Honorato, and Jorge I.Guevara Rosas. Pedestrian indoor navigation by aiding a foot-mounted IMU with RFID signal strength measurements. *2010 International Conference on Indoor Positioning*

-
- and Indoor Navigation, IPIN 2010 - Conference Proceedings*, No. September, pp. 15–17, 2010.
- [17] Halgurd S Maghdid, Ihsan Alshahib Lami, Kayhan Zrar Ghafoor, and Jaime Lloret. Seamless outdoors-indoors localization solutions on smartphones: implementation and challenges. *ACM Computing Surveys*, Vol. 48, No. 4, p. 53, 2016.
- [18] Lionel M. Ni, Yunhao Liu, Yiu Cho Lau, and Abhishek P. Patil. LANDMARC: Indoor location sensing using active RFID. *Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications, PerCom 2003*, No. June 2014, pp. 407–415, 2003.
- [19] Paramvir Bahl Padmanabhan and Venkata N. RADAR: An in-building RF based user location and tracking system. In *Proceedings IEEE INFOCOM 2000. Conference on Computer Communications. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (Cat. No.00CH37064)*, pp. 775–784, 2000.
- [20] Suining He and S. H.Gary Chan. Wi-Fi fingerprint-based indoor positioning: Recent advances and comparisons. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, Vol. 18, No. 1, pp. 466–490, 2016.
- [21] Chao Cai, Xiaoqiang Ma, Menglan Hu, Yang Yang, Zhetao Li, and Jiangchuan Liu. SAP: A Novel Stationary Peers Assisted Indoor Positioning System. *IEEE Access*, Vol. 6, pp. 76475–76489, 2018.
- [22] Wenhua Shao, Haiyong Luo, Fang Zhao, Yan Ma, Zhongliang Zhao, and Antonino Crivello. Indoor Positioning Based on Fingerprint-Image and Deep Learning. *IEEE Access*, Vol. 6, pp. 74699–74712, 2018.
- [23] Beakcheol Jang and Hyunjung Kim. Indoor positioning technologies without offline fingerprinting map: A survey. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, Vol. 21, No. 1, pp. 508–525, 2019.
- [24] Junnan Gao, Fang Yang, and Xu Ma. Indoor positioning system based on visible light communication with gray-coded identification. *2017 13th International Wireless Com-*

- munications and Mobile Computing Conference, IWCMC 2017*, No. June, pp. 899–903, 2017.
- [25] Dominic C. O’Brien, Lubin Zeng, Hoa Le-Minh, Grahame Faulkner, Joachim W. Walewski, and Sebastian Randel. Visible Light Communications: Challenges and possibilities. *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC*, Vol. 21, No. 4, pp. 3204 – 3237, 2008.
- [26] Luiz Eduardo Mendes Matheus, Alex Borges Vieira, Luiz F.M. Vieira, Marcos A.M. Vieira, and Omprakash Gnawali. Visible Light Communication: Concepts, Applications and Challenges. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, Vol. 21, No. 4, pp. 3204–3237, 2019.
- [27] C. Leonard Bennett and Gerald F. Ross. Time-domain electromagnetics and its applications. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 66, No. 3, pp. 299–318, 1978.
- [28] Yuan Xu, Guohui Tian, and Xiyuan Chen. Enhancing ins/UWB integrated position estimation using federated efir filtering. *IEEE Access*, Vol. 6, pp. 64461–64469, 2018.
- [29] Yuan Xu, Yuriy S. Shmaliy, Yueyang Li, and Xiyuan Chen. UWB-Based Indoor Human Localization with Time-Delayed Data Using EFIR Filtering. *IEEE Access*, Vol. 5, pp. 16676–16683, 2017.
- [30] Jun Xu, Maode Ma, and Choi Look Law. Cooperative angle-of-arrival position localization. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, Vol. 59, pp. 302–313, 2015.
- [31] Cesar Briso, Cesar Calvo, and Youyun Xu. UWB Propagation Measurements and Modelling in Large Indoor Environments. *IEEE Access*, Vol. 7, pp. 41913–41920, 2019.
- [32] Huan Bang Li, Ryu Miura, Hisashi Nishikawa, Toshinori Kagawa, and Fumihide Kojima. Proposals and implementation of high band IR-UWB for increasing propagation distance for indoor positioning. *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, Vol. E101A, No. 1, pp. 185–194, 2018.

-
- [33] Koichi Mizutani, Naoto Wakatsuki, and Tadashi Ebihara. Introduction of measurement techniques in ultrasonic electronics: Basic principles and recent trends. *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 55, No. 7S1, p. 07KA02 (16 pages), 2016.
- [34] Wenling Li, Yingmin Jia, and Junping Du. TOA-based cooperative localization for mobile stations with NLOS mitigation. *Journal of the Franklin Institute*, Vol. 353, No. 6, pp. 1297–1312, 2016.
- [35] Ismail Güvenç and Chia Chin Chong. A survey on TOA based wireless localization and NLOS mitigation techniques. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, Vol. 11, No. 3, pp. 107–124, 2009.
- [36] Patrick Lazik and Oliver Shih. ALPS : A Bluetooth and Ultrasound Platform for Mapping and Localization. *ACM SenSys*, pp. 73–84, 2015.
- [37] 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. 7, p. 07JC07 (6 pages), 2017.
- [38] Nissanka B Priyantha, Anit Chakraborty, and Hari Balakrishnan. The Cricket Location-Support System. In *Proceedings of 6th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (ACM)*, Vol. 2000, p. 12 pages, 2000.
- [39] Adam Smith, Hari Balakrishnan, Michel Goraczko, and Nissanka Priyantha. Tracking moving devices with the cricket location system. *Proceedings of the 2nd international conference on Mobile systems, applications, and services - MobiSYS '04*, p. 190, 2004.
- [40] Nissanka Bodhi Priyantha. *The Cricket Indoor Location System*. PhD thesis, 2005.
- [41] Regina Kaune. Accuracy studies for TDOA and TOA localization. *2012 15th International Conference on Information Fusion (FUSION)*, pp. 408 –415, 2012.
- [42] Zhiping Jiang, Wei Xi, Xiang-Yang Li, Jizhong Zhao, and Jisong Han. HiLoc : A TDoA-Fingerprint Hybrid Indoor Localization System. In *Microsoft Indoor Localization Competition*, p. 600, Sapporo, 2014.

- [43] Bin Xu, Ran Yu, Guodong Sun, and Zheng Yang. Whistle: Synchronization-free TDOA for localization. *Proceedings - International Conference on Distributed Computing Systems*, pp. 760–769, 2011.
- [44] Satoki Ogiso, Takuji Kawagishi, Koichi Mizutani, Naoto Wakatsuki, and Keiichi Zempo. Self-localization method for mobile robot using acoustic beacons. *ROBOMECH Journal*, Vol. 2, No. 1, pp. 1–12, 2015.
- [45] Charles H. Knapp and G. Clifford Carter. The Generalized Correlation Method for Estimation of Time Delay. *Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE Transactions on*, Vol. 24, No. 4, pp. 320–327, 1976.
- [46] 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*, Vol. 1075, No. 1, p. 012025 (6 pages), 2018.
- [47] Satoki Ogiso, Koichi Mizutani, Naoto Wakatsuki, and Tadashi Ebihara. Evaluation of Time-Difference-of-Arrival Error of Acoustic Beacons Caused by Velocity of Microphone Array. *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1075, No. 1, p. 012046 (6 pages), 2018.
- [48] Hui Liu, Houshang Darabi, Pat Banerjee, and Jing Liu. Survey of wireless indoor positioning techniques and systems. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Part C: Applications and Reviews*, Vol. 37, No. 6, pp. 1067–1080, 2007.
- [49] Alastair H. Moore, Christine Evers, and Patrick A. Naylor. Direction of Arrival Estimation in the Spherical Harmonic Domain Using Subspace Pseudointensity Vectors. *IEEE/ACM Transactions on Audio Speech and Language Processing*, Vol. 25, No. 1, pp. 178–192, 2017.
- [50] A. Canclini, F. Antonacci, A. Sarti, and S. Tubaro. Acoustic source localization with distributed asynchronous microphone networks. *IEEE Transactions on Audio, Speech and Language Processing*, Vol. 21, No. 2, pp. 439–443, 2013.
- [51] Christine Evers and Patrick A Naylor. Acoustic SLAM, 2018.

-
- [52] Vladimir Tourbabin and Boaz Rafaely. Theoretical framework for the optimization of microphone array configuration for humanoid robot audition. *IEEE/ACM Transactions on Audio Speech and Language Processing*, Vol. 22, No. 12, pp. 1803–1814, 2014.
- [53] R Tanabe, Y Sasaki, and H Takemura. Probabilistic 3D sound source mapping system based on monte carlo localization using microphone array and LIDAR. *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 29, No. 1, pp. 94–104, 2017.
- [54] Je Sen Teh, Amir Akhavan, and Azman Samsudin. Dilution of precision in angle-of-arrival positioning systems. *Electronics Letters*, Vol. 42, No. 5, p. 2 pages, 2006.
- [55] Jesus Urena, Alvaro Hernandez, J. Jesus Garcia, Jose M. Villadangos, M. Carmen Perez, David Gualda, Fernando J. Alvarez, and Teodoro Aguilera. Acoustic Local Positioning With Encoded Emission Beacons. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 106, No. 6, pp. 1042–1062, 2018.
- [56] Satoki Ogiso, Takuji Kawagishi, Koichi Mizutani, Naoto Wakatsuki, and Keiichi Zempo. Relation between sound sources layout and error of self-localization method in two-dimension for mobile robot using microphone array. In *Proceedings of the 22th International Congress on Sound & Vibration (ICSV22)*, No. July, pp. 01–0626, Florence, 2015.
- [57] 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. 7, p. 07HC14, 2015.
- [58] R. Gold. Optimal binary sequences for spread spectrum multiplexing (Corresp.). *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 13, No. 4, pp. 619–621, 1967.
- [59] Mike Hazas and Andy Ward. A Novel Broadband Ultrasonic Location System. In *Proceedings of UbiComp 2002: Fourth International Conference on Ubiquitous Computing*, Vol. 2498, pp. 264–280, 2007.

- [60] Jian Li, Guangjie Han, Chunsheng Zhu, and Guiqing Sun. An Indoor Ultrasonic Positioning System Based on TOA for Internet of Things. *Mobile Information Systems*, Vol. 2016, , 2016.
- [61] J. R. Gonzalez and C. J. Bleakley. High-Precision robust broadband ultrasonic location and orientation estimation. *IEEE Journal on Selected Topics in Signal Processing*, Vol. 3, No. 5, pp. 832–844, 2009.
- [62] David Ribas, Pere Ridao, and José Neira. Underwater SLAM for Structured Environments Using an Imaging Sonar. *Springer Tracts in Advanced Robotics*, No. 1, pp. 1–5, 2010.
- [63] J.M. Perez-Lorenzo, R. Viciano-Abad, P. Reche-Lopez, F. Rivas, and J. Escolano. Evaluation of generalized cross-correlation methods for direction of arrival estimation using two microphones in real environments. *Applied Acoustics*, Vol. 73, No. 8, pp. 698–712, 8 2012.
- [64] D F Albuquerque, J M N Vieira, S I Lopes, and Teodoro Aguilera. Doppler resilient modulation in a CDMA-based Acoustic Local Positioning System. In *Proceedings of the 7th International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, IPIN2016*, pp. 140–RP(8 pages), 2016.
- [65] Satoki Ogiso, Koichi Mizutani, Naoto Wakatsuki, and Tadashi Ebihara. Robust Localization of Mobile Robot in Reverberant Rooms Using Acoustic Beacons with Iterative Bayesian Filtering. In *Proceedings of the 9th International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, p. 212867 (6 pages), 2018.
- [66] Satoki Ogiso, Koichi Mizutani, Naoto Wakatsuki, and Tadashi Ebihara. Robust Indoor Localization in a Reverberant Environment Using Microphone Pairs and Asynchronous Acoustic Beacons. *IEEE Access*, Vol. 7, pp. 123116–123127, 2019.
- [67] JR Klauder, AC Price, S Darlington, and WJ Albersheim. The theory and design of chirp radars. *The Bell System Technical Journal*, Vol. XXIX, No. 4, pp. 745–808, 1960.

著者文献

学位請求申請に関係のある論文

査読付雑誌論文

- (J-1) Satoki Ogiso, Takuji Kawagishi, Koichi Mizutani, Naoto Wakatsuki, and Keiichi Zempo: “Self-localization method for mobile robot using acoustic beacons,” ROBOMECH Journal, Vol. 2, No.12, pp.1-12, 2015.
- (J-2) Satoki Ogiso, Koichi Mizutani, Naoto Wakatsuki and Tadashi Ebihara: “Robust indoor localization in a reverberant environment using microphone pairs and asynchronous acoustic beacons,” IEEE Access, Vol. 7, No. 1, pp. 123116-123127, 2019.

査読付国際会議論文

- (P-1) Satoki Ogiso, Takuji Kawagishi, Koichi Mizutani, Naoto Wakatsuki and Keiichi Zempo: “Relation between sound sources layout and error of self-localization method in two-dimension for mobile robot using microphone array,” Proceeding of the 22nd International Congress on Sound and Vibration (ICSV22), 626(R), 4-pages (Florence, Italy, 15 June 2015).
- (P-2) Satoki Ogiso, Takuji Kawagishi, Koichi Mizutani, Naoto Wakatsuki and Keiichi Zempo: “Effect of Parameters of Phase-modulated Sequence Signal on Direction-of-Arrival and Localization error,” Proceeding of the 7th International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN2016), 141-RP (6 pages), (Madrid, Spain, 5 October, 2016).
- (P-3) Satoki Ogiso, Koichi Mizutani, Naoto Wakatsuki and Tadashi Ebihara : “Evaluation of Time-Difference-of-Arrival Error of Acoustic Beacons Caused by Velocity of Micro-

phone Array,” *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1075, conference 1, 012046 (6-pages) (Bali, Indonesia, 28 November, 2017).

- (P-4) **Satoki Ogiso**, Koichi Mizutani, Naoto Wakatsuki and Tadashi Ebihara : “Robust Localization of Mobile Robot in Reverberant Rooms Using Acoustic Beacons with Iterative Bayesian Filtering,” *Proceeding of the 9th International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN2018)*, 212867 (6-pages) (Nantes, France, 26 September, 2018).

学位請求申請に関係のない論文

査読付国際会議論文

- (P-1) Satoki Ogiso, Takuji Kawagishi, Koichi Mizutani, Keiichi Zempo, and Naoto Wakatsuki: “Effect of sound separation using pulse-compression on accuracy of localization with acoustic beacons,” Proceeding of the 6th International Conference on Advanced Mechatronics (ICAM2015), pp.292-293 (Tokyo, 7 December, 2015).

査読なし発表論文

- (D-1) 小木曾 里樹, 川岸卓司, 水谷孝一, 善甫啓一, 若槻尚斗: “少素子マイクロホンアレイを用いる移動ロボットの2次元自己位置推定法,” 日本音響学会 2014 年秋季研究発表会講演論文集, pp.1357-1360 (札幌, 5 September, 2014).
- (D-2) Satoki Ogiso, Koichi Mizutani: “Self-localization of indoor mobile robot using triangular microphone array,” The 11th IEEE Transdisciplinary-Oriented Workshop for Emerging Researchers Programs & Abstracts, p.22, (東京, 29 November, 2014).
- (D-3) 小木曾 里樹, 川岸卓司, 水谷孝一, 善甫啓一, 若槻尚斗: “マイクロホンアレイを用いる移動ロボットの2次元自己位置推定法,” SAT テクノロジー・ショーケース 2015, プログラム & アブストラクト集, p.83, (つくば, 21 January, 2015).
- (D-4) 小木曾 里樹, 川岸卓司, 水谷孝一, 善甫啓一, 若槻尚斗: “パルス圧縮音源を用いる2次元移動ロボットの自己位置推定,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会論文集, 2A2-N02, (京都, 19 May, 2015).
- (D-5) 小木曾 里樹, 川岸卓司, 水谷孝一, 善甫啓一, 若槻尚斗: ” M 系列符号を用いる音響ビーコンの音源方向推定及び自己位置推定への影響,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会論文集, 1P1-07b6 (2 pages) (横浜, 7 June 2016).
- (D-6) 小木曾 里樹, 川岸卓司, 水谷孝一, 善甫啓一, 若槻尚斗: “音響ビーコンとマイクアレイによる移動ロボットの位置推定,” SAT テクノロジー・ショーケース 2017, プログラム & アブストラクト集, p.109, (つくば, 31 January 2017).

- (D-7) 小木曾 里樹, 水谷孝一, 若槻尚斗, 海老原格: “マイクロホンアレイ素子間の相関を尤度と仮定する屋内音響測位手法,” 日本機械学会, ロボティックス・メカトロニクス講演会 2018 講演会論文集, 1A1-J02 (4 pages), (北九州, 4 May, 2018).
- (D-8) 小木曾 里樹, 水谷孝一, 若槻尚斗, 海老原格: “非同期音響ビーコンと2素子のマイクロアレイを用いる到来時間差に基づく音響測位,” 日本機械学会, ロボティックス・メカトロニクス講演会 2019 講演会論文集, 1P2-R04 (2 pages), (広島, 6 June, 2019).

本論文の著作権について

本論文で使用した図表のうち、著者文献にて公表済みのもので同一のものについては、本論文へ掲載することが許可されたライセンスに基づいて掲載している。

第2章の図表は Satoki Ogiso et al., "Self-localization method for mobile robot using acoustic beacons," *Robomech Journal* (著者文献 (J-1)) より再掲しており、ライセンスは CC BY 3.0 に基づく。

第3章3節の図表は Satoki Ogiso et al., "Effect of Parameters of Phase-modulated Sequence Signal on Direction-of-Arrival and Localization error," in *Proc. of IPIN 2016* (著者文献 (P-2)) より再掲しており、以下の再利用規定に基づく。

Thesis / Dissertation Reuse

The IEEE does not require individuals working on a thesis to obtain a formal reuse license, however, you may print out this statement to be used as a permission grant:

Requirements to be followed when using any portion (e.g., figure, graph, table, or textual material) of an IEEE copyrighted paper in a thesis:

- 1) In the case of textual material (e.g., using short quotes or referring to the work within these papers) users must give full credit to the original source (author, paper, publication) followed by the IEEE copyright line © 2011 IEEE.
- 2) In the case of illustrations or tabular material, we require that the copyright line © [Year of original publication] IEEE appear prominently with each reprinted figure and/or table.
- 3) If a substantial portion of the original paper is to be used, and if you are not the senior author, also obtain the senior author's approval.

Requirements to be followed when using an entire IEEE copyrighted paper in a thesis:

- 1) The following IEEE copyright/ credit notice should be placed prominently in the references: © [year of original publication] IEEE. Reprinted, with permission, from [author names, paper title, IEEE publication title, and month/year of publication]
- 2) Only the accepted version of an IEEE copyrighted paper can be used when posting the paper or your thesis on-line.
- 3) In placing the thesis on the author's university website, please display the following message in a prominent place on the website: In reference to IEEE copyrighted material which is used with permission in this thesis, the IEEE does not endorse any of [university/educational

entity's name goes here]'s products or services. Internal or personal use of this material is permitted. If interested in reprinting/republishing IEEE copyrighted material for advertising or promotional purposes or for creating new collective works for resale or redistribution, please go to http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/rights_link.html to learn how to obtain a License from RightsLink.

If applicable, University Microfilms and/or ProQuest Library, or the Archives of Canada may supply single copies of the dissertation.

第3章4節の図表は Satoki Ogiso et al., "Evaluation of Time-Difference-of-Arrival Error of Acoustic Beacons Caused by Velocity of Microphone Array," *Journal of Physics: Conference Series* (著者文献 (P-3)) より再掲しており, ライセンスは CC BY 3.0 に基づく.

第4章の図表は Satoki Ogiso et al., "Robust indoor localization in a reverberant environment using microphone pairs and asynchronous acoustic beacons," *IEEE Access* (著者文献 (J-2)) より再掲しており, ライセンスは CC BY 4.0 に基づく.