

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 4月25日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560454

研究課題名（和文）自動車の排気音を用いたリアソナーの開発

研究課題名（英文）Development of rear sonar using exhaust sound of automobile

研究代表者

中迫 昇（NAKASAKO NOBORU）

近畿大学・生物理工学部・教授

研究者番号：90188920

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、自動車の消音管（マフラー）から出る排気音を用いて、自動車の後方にある障害物を検知するためのリアソナーを実現することにある。（1）可聴音域での定在波を用いた距離推定に関して、基本的な性能とその様々な応用の可能性を検討した。（2）スピーカ、対象物とマイクロホンの幾何学的配置による推定誤差や、観測雑音と測定系の影響による誤差を低減する方法を開発した。また、（3）最小探知距離よりも短い距離を測定するための方法も提案した。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to realize a rear-sonar of automobile for detecting obstacles (or targets) behind the automobile, using the exhaust sound of the automobile emitted from the automobile muffler. (1) We considered the fundamental properties and potentials of the distance estimation method based on the phase interference of audible sound. (2) We developed several methods, so as to reduce the error due to geometrical positions of the loudspeaker, target and microphone and the error due to the effect of the observation noise and measurement system. Furthermore, (3) we proposed a distance measurement method to measure the distance shorter than the minimum measurable distance.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：計測工学

科研費の分科・細目：センシング情報処理

キーワード：パワースペクトル、マイコン化、リアソナー、リニアチャープ音、定在波、排気音、推定距離の補正、距離スペクトル

1. 研究開始当初の背景

近年、女性や高齢者のドライバーが急増しており、運転しやすい「人に優しい乗り物」の人气が高まっており、たとえば、リアソナーは後方の障害物を知らせてくれることか

ら、ドライバーの運転をサポートしてくれる。

リアソナーには、現在、超音波や電波が一般的に用いられているが、対象物までの距離を推定する技術が基本的に重要である。通常の推定原理としては、入射波と対象物からの

反射波との時間差が利用されている。しかしながら、距離が短く入射波が十分減衰しない間に反射波が返ってくる場合には、反射波が送信波に埋もれ推定できないなどの問題が残されていた。

これに対しマイクロ波レーダの分野では、定在波を利用して近距離計測を行う手法が知られている。既に中迫らは、この推定原理を可聴音に拡張し、理論的にも実験的にもその推定法の性質や有効性の一部を確認している。本研究では、自動車の消音管（マフラー）から出る排気音を用いて、自動車の後方にある障害物を検知するためのリアソナーの実現を目指す。

2. 研究の目的

本研究の目的は、自動車の消音管（マフラー）から出る排気音を用いて、自動車の後方にある障害物を検知するためのリアソナーを実現することにある。具体的な目的は、次の3つに分けられた。

(1) 定在波に基づく音響測距法の性質と応用の可能性：本研究の基本となるのは、定在波に基づく音響測距法である。そこで、この測距法に関して、基本的な性能とその様々な応用の可能性を検討する。

(2) 音響測距法の誤差とその低減対策：定在波に基づく音響測距法には、スピーカ、対象物とマイクロホンの幾何学的配置によっては推定誤差が生じることがある。また、観測雑音が存在する場合や、測定系の周波数-振幅特性の影響によっても誤差を生じることがある。これらの測定誤差を低減する方法を提案する。

(3) 最小探知距離よりも短い距離の測定：定在波に基づく音響測距法では、最小探知距離は送信波の帯域幅によって決定され、最小探知距離を短くするためには帯域幅の広い送信波を用いる必要があった。送信波の帯域幅を広げることなく、最小探知距離よりも短い距離を測定するための方法を提案する。

3. 研究の方法

まず、研究の基本である定在波に基づく音響測距法について簡単にまとめておく。

対象物に向けて放射される送信音を次式とする。

$$v_T(t, x) = \sum_{i=1}^N A_i e^{j(2\pi f_i t - \frac{2\pi f_i x}{c} + \theta_i)} \quad (1)$$

ただし、 t は時刻 (s), x_s はマイクロホン位置 (m), c は伝播速度 (m/s) である。また、 A_i , f_i , θ_i はそれぞれ第 i 周波数成分の振幅, 周波数 (Hz), および初期位相である

($i = 1, 2, K, N$).

いま、この送信音が m 個の対象物によって反射されるとすると、 n 番目の対象物で反射された反射音 $v_{R_n}(t, x_s)$ は

$$v_{R_n}(t, x) = \sum_{i=1}^N A_i \gamma_n e^{j(2\pi f_i t - \frac{2\pi f_i}{c}(2d_n - x) + \theta_i + \phi_n)} \quad (2)$$

となる。ここで、 γ_n , ϕ_n は n 番目の対象物の反射係数の大きさと位相, d_n は n 番目の対象物の位置 (m) を表す。

マイクロホンの位置を原点, つまり $x_s = 0$ とすれば、 d_n はマイクロホンと対象物間の距離となる。その結果、 $x = x_s$ において観測される合成波 $v_C(t, x_s)$ は

$$v_C(t, x_s) = v_T(t, x_s) + \sum_{n=1}^m v_{R_n}(t, x_s) \quad (3)$$

となる。

観測された合成波を周波数領域へ変換するためフーリエ変換を適用する。ただし、 $f_i = f$ とする。

$$V_C(f, x_s) = \int_{-\infty}^{\infty} v_C(t, x_s) e^{-j2\pi ft} dt \quad (4)$$

合成波 $V_C(f, x_s)$ の各周波数におけるパワー $p(f, x_s)$ は次式で与えられる。

$$p(f, x_s) = |V_C(f, x_s)|^2 \quad (5)$$

振幅を一定 ($A_i = A$; $i = 1, 2, K, N$) とすると、反射係数の大きさ γ_n が十分小さい ($\gamma_n \ll 1$; $n = 1, 2, K, m$) とときには、 $p(f, x_s)$ は次のように近似できる。

$$p(f, x_s) \approx A^2 \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^m \gamma_n \cos \left(\frac{4\pi f (d_n - x_s)}{c} - \phi_n \right) \right\} \quad (6)$$

上式右辺第1項が送信波の成分, 第2項が定在波により生じた成分である。

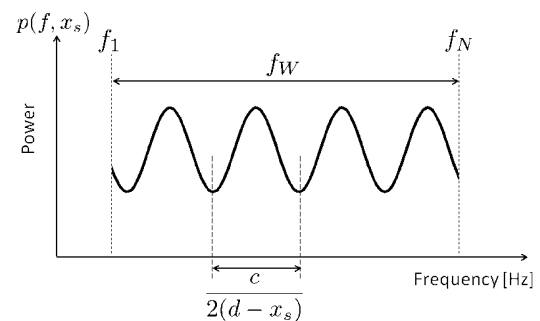


図1 観測信号のパワースペクトル

A_i が周波数に依らず一定の場合、 $p(f, x_s)$ は周期関数となる。距離 d_n の位置に対象物が1つ存在する場合に観測される $p(f, x_s)$ の一例を図1に示す。その周期関数の周期はマイクロホンと対象物間の距離 $d_n - x_s$ に反比例するため、 $p(f, x_s)$ をフーリエ変換することによって距離 $d_n - x_s$ を求めることができる。

具体的には、まず送信音の成分を除去し、距離に関係する変動成分のみを取り出すために、 $p(f, x_s)$ から平均値を引いた $\Delta p(f, x_s)$ にフーリエ変換を施す。

すなわち、フーリエ変換公式の変数を置き換え、帯域を考慮することにより

$$P(x) = \int_{f_1}^{f_N} \Delta p(f, x_s) e^{-j2\pi \frac{x}{d_n - x_s} f} df \quad (7)$$

から求まる $P(x)$ の絶対値 $|P(x)|$ を距離スペクトルと呼んでおり、図2に示すように、 $|P(x)|$ のピーク位置がマイクロホンと対象物間の距離 $d_n - x_s$ の推定値となる。

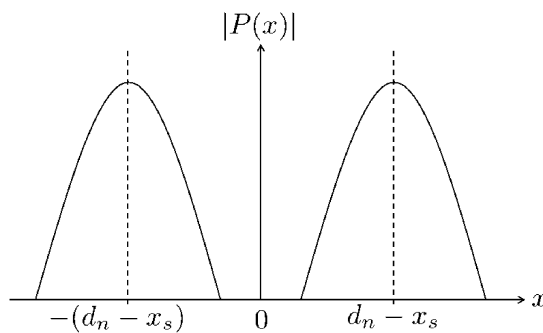


図2 距離スペクトルの一例

上述の定在波に基づく音響測距法をもとに、研究の3つの具体的な目的：(1) 定在波に基づく音響測距法の性質と応用の可能性、(2) 音響測距法の誤差とその低減対策、(3) 最小探知距離よりも短い距離の測定、に沿いながら、リアソナーの実現に向けて、様々な検討を行なった。

研究の方法としては、いずれの目的に対しても、まず理論を構築し、シミュレーションや予備実験を経て理論を修正したのち、実際の音場に適用して理論の実際の有効性を確認するようにしている。

4. 研究成果

研究期間の3年間に様々な成果を得た。研

究の3つの目的に沿って説明する。

(1) 定在波に基づく音響測距法の性質と応用の可能性：①研究の基本となる定在波に基づく音響測距法は観測信号にフーリエ変換を2度施す簡単な手法であり、その原理について解説した(中迫他、システム/制御/情報、5、314-319)。②この手法は自己相関関数やケプストラムと手順が似ているため、それら手法との類似点や相違点について検討した(中迫他、騒音制御、34、186-194)。これにより、既存の自己相関関数やケプストラムなどを改良しても、距離推定が可能であり、マイコンへの実装も可能と思われる。また、③周波数-振幅特性がフラットな音源として帯域インパルス音や位相ランダム音(周波数-振幅特性がフラットだが位相がランダム)などを採用してきたが、時間とともに周波数が増えるリニアチャープ信号を送信音とした場合についても、同じ原理により距離推定が可能であることを理論的および実験的に示した(英 慎平 他、電学論 C, 129, 2027-2033)。これにより、リニアチャープ信号であれば、ほぼリアルタイムに距離推定が可能であり、マイコンへの実装も可能と思われる。④提案手法では、送信波と対象物からの反射波の干渉を利用しているが、通常は音源あるいはマイクロホンからも反射が起こる(多重反射)。多重反射の起こっている観測音に提案手法を適用すると、音源までの距離を求めることもできることを示した(N. Nakasako et al., Proc. of INTER-NOISE 2011(CD-ROM 収録の pp. 1-6))。⑤距離推定法を複数マイクロホンに拡張することで、対象物までの距離と方位より話者(対象物)位置を推定する手法を提案した(中山他、電学論 C, 130, 1194-2000)。⑥提案手法は音を使って対象物までの距離を測定する方法であるが、簡易な立体音場システム(中山他、信学論 A, J94, 313-322)あるいは遠隔会議システム(M. Nakayama et al., Proc. of INTER-NOISE 2011(CD-ROM 収録の pp. 1-6))の構築への応用の可能性を示した。これにより本手法を用いて対象物が人間であったとしても距離も求めることができる可能性が広がった。

(2) 音響測距法の誤差とその低減対策：①従来、推定値は常に真値より少し小さい値が得られた。これはスピーカボックスの物理的大きさによるものである。この問題点を改善するために、スピーカ-対象物-マイクの幾何学的配置を考慮して推定値の補正を行なった(N. Nakasako et al., Proc. of ITC-CSCC 2009, 580-583, S. Hanabusa et al., Proc. of APSIPA ASC 2009, 237-240)。これにより、

自動車のマフラーなどの音源を利用する場合についても、距離の推定値の補正が可能と思われる。②本推定法は観測信号にフーリエ変換を2度施す簡単な手法であるが、実音場では観測雑音と測定系の影響により距離が正しく測定できない場合がある。そこで、いくつかの対策法を提案し良好な結果を得た (M. Nakayama et. al., IEICE Trans. Fundamentals, E94-A, 1638-1646. M. Nakayama et. al., Proc. of ISCIT 2010, 176-181. 中山他、信学論 A, J94, 676-679. 中山他、電学論 C, 131, 1864-1870)。

(3) 最小探知距離よりも短い距離の測定：定在波に基づく音響測距法では、最小探知距離は送信波の帯域幅に依存し、最小探知距離を短くするためには帯域幅の広い送信波を用いる必要があった。その原因として、定在波に基づく測距法はパワースペクトルという実関数のフーリエ変換を用いているために、距離スペクトルにおいて、正負の距離成分が軸対象に現れるが、とくに最小探知距離未満では正負の距離成分が干渉し合い、正確な距離を求めることができない。そこで、パワースペクトルの代わりに解析信号を導入し、そのフーリエ変換として求まる距離スペクトルでは負の距離成分が除去される。2つのマイクロホンを用いて、複素数の解析信号の実部・虚部（あるいは振幅と位相）を求める手法を提案した (K. Kawanishi et. al., Proc. of ISCIT2010, 164-169)。これにより、接触するかしないかのぎりぎりの距離まで、すなわち 0m の距離まで測定可能となった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 15 件)

- ① 中山雅人, 英 慎平, 中迫昇, 篠原寿広, 上保徹志, 同期加算とスペクトル減算に基づく雑音環境に頑健な音響測距法, 電気学会論文誌 C, 131(11), 1864-1870, 2011, 査読有
- ② N. Nakasako, S. Hanabusa, T. Shinohara and T. Uebo, Estimation of distance from sound source using single microphone based on interference between transmitted and reflected waves, Proc. of 40th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (INTER-NOISE 2011), 1-6 (CD-ROM 収録), 2011, 査読有
- ③ M. Nakayama, T. Nishiura, Y. Yamashita and N. Nakasako, Multiple-nulls-steering beamformer based on both talkers and noises localizations, Proc. of 40th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (INTER-NOISE 2011), 1-6 (CD-ROM 収録), 2011, 査読有
- ④ 中山雅人, 英 慎平, 中迫昇, 篠原寿広, 上保徹志, 同期減算処理を利用した位相干渉に基づく音響測距法の検討, 電子情報通信学会論文誌 A, J94(8), 676-679, 2011, 査読有
- ⑤ M. Nakayama, S. Hanabusa, T. Uebo and N. Nakasako, Acoustic distance measurement method based on phase interference using calibration and whitening processing in real environments, IEICE Trans. Fundamentals, E94-A(8), 1638-1646, 2011, 査読有
- ⑥ 中山雅人, 廣畑和紀, 中迫昇, 左右の近距離スピーカを利用した音響測距法に基づく音場再現手法, 電子情報通信学会論文誌 A, J94(5), 313-322, 2011, 査読有
- ⑦ M. Nakayama, S. Hanabusa, N. Nakasako and T. Uebo, Robust Acoustic Distance Measurement Method Based on Interference in Noisy Environments, Proc. of 2010 International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT 2010), 176-181, 2010, 査読有
- ⑧ K. Kawanishi, N. Nakasako, T. Shinohara and T. Uebo, Distance Estimation Method Measurable from 0m Based on Standing Wave Using Band-limited Sound with Uniform Amplitude and Random Phase, Proc. of 2010 International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT 2010), 164-169, 2010, 査読有
- ⑨ 中山雅人, 中迫昇, 篠原寿広, 上保徹志, 可聴音の送信波と反射波の位相干渉に基づく話者位置推定, 電気学会論文誌 C, 130(11), 1194-2000, 2010, 査読有
- ⑩ 中迫昇, 上保徹志, 篠原寿広, 音で距離を測る (定在波に基づく距離推定の原理) (解説論文), システム/制御/情報, 54(8), 314-319, 2010, 査読無
- ⑪ T. Uebo, N. Nakasako, N. Ohmata and H. Itagaki, Distance Estimation to Multiple Targets Using Band-Limited Noise Signal, Electronics and Communications in Japan, Wiley Periodicals Inc., 93(7), 53-60, 2010

(電気学会論文誌C部門からの翻訳),
査読無

- ⑫ 中迫昇, 上保徹志, 森淳, 篠原寿広, 送信音と反射音の干渉に基づく距離推定に関する基礎的検討, 騒音制御, 34(2), 186-194, 2009, 査読有
 - ⑬ H. Hanabusa, N. Nakasako, T. Uebo and T. Shinohara, Correction Method of Estimated Distance Using Geometrical Information on Sound Source and Microphone, Proc. of 2009 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association, Annual Summit and Conference (APSIPA ASC 2009), 237-240, 2009, 査読有
 - ⑭ 英慎平, 上保徹志, 土田悠太, 篠原寿広, 中迫昇, 可聴音リニアチャープ信号の干渉を利用した距離推定法, 電気学会論文誌 C, 129(11), 2027-2037, 2009 査読有
 - ⑮ N. Nakasako, S. Hanabusa, T. Shinohara and T. Uebo, Distance Estimation and Compensation Method Using Band-limited Transmitted Wave with Uniform Amplitude and Random Phase Characteristics, Proc. of 24th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC 2009), 340-343, 2009, 査読有
- [学会発表] (計 31 件)
- ① 中山 雅人, 西浦 敬信, 山下 洋一, 中迫昇, 話者と雑音の方位推定に基づく複数死角制御型ビームフォーマの検討, 日本音響学会研究発表会, 2012 年 3 月 15 日, 神奈川大学横浜キャンパス (横浜市神奈川区)
 - ② 廣畑 和紀, 中山 雅人, 中迫昇, 左右のパラメトリックスピーカを用いた音響測距に基づく立体音場再現 (距離減衰, 両耳間時間差と回折音に関する検討), 日本音響学会研究発表会, 2012 年 3 月 14 日, 神奈川大学横浜キャンパス (横浜市神奈川区)
 - ③ 中山 雅人, 根木 佑真, 中迫昇, 雑音環境下における情報提示音声の位相干渉に基づく音響測距法の検討, 日本音響学会研究発表会, 2012 年 3 月 14 日, 神奈川大学横浜キャンパス (横浜市神奈川区)
 - ④ 中迫昇, 河西慶治, 篠原寿広, 上保徹志, 1ch 観測の干渉音のパワースペクトル変動に基づく 0m から測定可能な音響測距法, 電子情報通信学会応用音響研究会, 2011 年 11 月 19 日, 熊本大学 (熊本市)
 - ⑤ 中迫昇, 河西慶治, 篠原寿広, 上保徹志,

河本敬子, パワースペクトルのフーリエ変換に基づく距離 0m から測定可能な音響測距法の検討, 平成 23 年電気関係学会関西支部連合大会, 2011 年 10 月 29 日, 兵庫県立大学 姫路書写キャンパス (姫路市)

- ⑥ 中山 雅人, 英 慎平, 上保 徹志, 篠原 寿広, 中迫昇, 位相干渉に基づく音響測距法における対象物の反射係数と距離減衰の影響の実験的検討, 日本音響学会研究発表会, 2011 年 9 月 20 日, 島根大学 (松江市)
- ⑦ 廣畑 和紀, 中山 雅人, 上保 徹志, 篠原 寿広, 中迫昇, 左右のパラメトリックスピーカを利用した音響測距法に基づく立体音場再現の基礎的検討, 2011 年 9 月 20 日, 島根大学 (松江市)
- ⑧ 中山雅人, 中迫昇, 篠原寿広, 上保徹志, 英 慎平, 情報提示音声を利用したロボットセンサの検討, 第 5 回システム制御情報学会研究発表講演会, 2011 年 5 月 18 日, 大阪大学コンベンションセンター (吹田市)
- ⑨ 中山雅人, 西浦敬信, 山下洋一, 中迫昇, 話者と音源の位置推定に基づく複数死角制御型ビームフォーマの基礎的検討, 電子情報通信学会応用音響研究会, 2011 年 5 月 13 日, 立命館大阪キャンパス (大阪市北区)
- ⑩ 中迫昇, 英 慎平, 篠原 寿広, 中山 雅人, 上保 徹志, 可聴音入力下の位相干渉に基づく距離推定法における送信音および測定系の周波数 (振幅特性の影響とその除去の試み), 日本音響学会研究発表会, 2011 年 3 月 10 日, 早稲田大学西早稲田キャンパス (東京都新宿区)
- ⑪ 廣畑 和紀, 中山 雅人, 中迫昇, 上保 徹志, 篠原 寿広, 高周波数帯域の送信音を利用した 2ch 音響測距による物体の位置計測法の検討, 日本音響学会研究発表会, 2011 年 3 月 9 日, 早稲田大学西早稲田キャンパス (東京都新宿区)
- ⑫ 西前 達矢, 中山 雅人, 中迫昇, 上保 徹志, 篠原 寿広, 情報提示音声の位相干渉と音素セグメンテーションに基づく音響測距法の検討, 日本音響学会研究発表会, 2011 年 3 月 9 日, 早稲田大学西早稲田キャンパス (東京都新宿区)
- ⑬ 中迫昇, 英 慎平, 篠原寿広, 中山雅人, 上保徹志, 実環境における可聴音の位相干渉に基づく距離推定 (送信音および測定系の周波数 - 振幅特性の影響除去のための各種試みと比較), 電子情報通信学会応用音響研究会, 2010 年 11 月 18 日, 九州大学大橋サテライト (福岡市南区)
- ⑭ 中迫昇, 英 慎平, 中山 雅人, 篠原 寿

広、上保 徹志、既知信号の減算を利用した位相干渉に基づく音響測距法の検討、日本音響学会研究発表会、2010年9月16日、関西大学(吹田市)

- ⑮ 中山 雅人、廣畑 和紀、中迫 昇、近距離スピーカを利用した音響測距法に基づく音場再現手法(再現音質とその補正法の検討)、日本音響学会研究発表会、2010年9月16日、関西大学(吹田市)
 - ⑯ 中山 雅人、太田 将史、篠原 寿広、中迫 昇、上保 徹志、2ch音響測距法とCSP法を統合した話者位置推定法の検討、日本音響学会研究発表会、2010年9月15日、関西大学(吹田市)
 - ⑰ 中迫 昇、篠原 寿広、上保 徹志、英慎平、人の気配察知能力の解明を目指した音による距離推定の基礎研究、第54回システム制御情報学会研究発表講演会、2010年5月21日、京都リサーチパーク(京都市)
 - ⑱ 中山雅人、中迫 昇、左右の近距離スピーカを利用した距離推定に基づく音場再現の検討、電子情報通信学会応用音響研究会、2010年5月27日、甲南大学(神戸市)
 - ⑲ 中迫 昇、英 慎平、上保 徹志、篠原 寿広、可聴音の送信波と反射波の位相干渉に基づく距離推定(送信音および測定系の周波数-振幅特性の影響除去の一試み)、電子情報通信学会応用音響研究会、2009年11月19日、県立広島大学(広島市)
 - ⑳ 中迫 昇、英 慎平、篠原 寿広、上保 徹志 定在波理論に基づく白色雑音入力下の距離推定(送信音および測定系の周波数-振幅特性の除去による計測回数への低減)、日本音響学会研究発表会、2009年9月16日、日本大学工学部(郡山市)
- その他 11件

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中迫 昇 (NAKASAKO NOBORU)
近畿大学・生物理工学部・教授
研究者番号：90188920

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし