

令和元年5月13日現在

機関番号：25406

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2015～2018

課題番号：15K06116

研究課題名（和文）骨導音と気導音のハイブリッド活用による音声信号の騒音抑制を目指したベイズフィルタ

研究課題名（英文）Bayesian filter aimed at noise suppression based on hybrid use of bone- and air-conducted speech signal

研究代表者

生田 顯（IKUTA, Akira）

県立広島大学・経営情報学部・名誉教授

研究者番号：30145164

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：実環境下での音声認識を可能にするため、骨導音および気導音の同時計測に基づき、音声信号を精密に抽出するための信号処理法を導出した。音声信号と気導音の関係は音圧の加法性により線形モデルで捉え、音声信号と骨導音との関係は、未知パラメータを含む線形モデルで捉えた。次に、音声信号・骨導音・気導音との間の各種相関情報を展開係数に反映した級数展開型のベイズ表現を用いることにより、周囲騒音の影響を抑制し高精度で音声信号を抽出するためのアルゴリズムを開発した。導出した音声信号推定法を、無響室で測定した音声信号に適用し、気導音のみの観測に基づく推定手法と比較することにより、本手法の有効性を実験的に確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、音声信号と骨導音の相関情報を活用したベイズフィルタにより音声信号を抽出した。ベイズ推定では、得られる情報（データ）の増加に従い推定精度が向上することから、骨導音と気導音の同時データを測定・活用することにより、それぞれの欠損情報を補うことができる。

音声認識システムは機器点検作業現場や魚・農産物のセリ市場などに導入され、業務効率化に貢献している。また、音声認証により開錠できる生体認証システムも実用化されており、新しいセキュリティとして注目されている。これらの技術で障害となるのは、周囲環境における騒音の存在である。本研究を活用した音声抽出技術の開発により、応用分野の拡大が期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, in order to suppress the noises that inevitably exist in the observed speech signal of actual environment, a signal processing method to remove the noise for actual speech signals was proposed by jointly using the measured data of bone- and air-conducted speech signals. According to the additive property of sound pressure, the observation of air-conducted speech signal can be expressed as a linear model of the speech signal and a background noise. Furthermore, a propagation model with unknown parameters was introduced as the bone-conducted speech signal model. By introducing Bayes' theorem based on an orthogonal expansion expression of probability distribution, an algorithm for noise suppression was proposed. By applying the proposed algorithm to real speech signals measured in an anechoic chamber, it was revealed by experiments that better estimation results were obtained by the proposed algorithm as compared with the method based on only air-conducted observations.

研究分野：音響信号処理

キーワード：音声信号 雑音抑制 骨導音 気導音 ベイズフィルタ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 音声認識システムは様々な分野に応用されており、特にパソコンなどが設置できない環境において、携帯端末やヘッドセットマイクを用い音声のみによりデータ入力を行わねばならない作業現場では必須となる。この分野においては、周囲の騒音が存在する実環境下での騒音対策が、現在、最も重要な研究課題である。本研究では、実環境下での音声認識を可能にするため、骨伝導音（声帯で発生した音声骨など体内を伝搬し、喉など身体表面で測定される振動）および気導音（口から放射される変動音圧）の同時計測に基づき、音声信号を精密に抽出するための新たな処理技術を、確率のベイズ推定を駆使することにより創出する。骨導音は周囲の騒音が入りにくい個体伝播音であるが、伝播過程で高周波成分が減衰する。一方、空気伝播音である気導音には騒音の混入が避けられないが、音声信号に対する全ての周波成分が保全され含まれている。したがって、両者のハイブリッド活用により、音声信号のみを精密に推定することが可能である。研究代表者は、これまで実際音響システムにおける雑音除去や適応信号処理に基づく能動騒音制御に関する研究を行ってきた。また、騒音の混入した音声データから音声信号のみを推定するための確率的信号処理法を提案してきた。さらに、骨導音を活用した音声信号処理法を提案した。従来多くの雑音除去法は、変動雑音のガウス分布性・白色性を前提としているのに対し、上記の研究では非ガウス・非白色性の雑音に対しても有効であり、実環境における状況により整合しているといえる。

(2) 従来から、音声認識における騒音対策法はいくつか提案されてきたが、それらの多くは、騒音の存在下においてマイクロフォンで測定された気導音に対し、何らかの信号処理を施すことにより騒音の影響を抑圧するものである。一方、骨導音は、声帯で発生した音声骨が身体表面へ伝播する振動である固体伝播音であるため周囲の騒音の影響を受けにくい。しかし、加速度ピックアップにより身体表面で計測された骨導音は、マイクロフォンにより測定された音声と比べて高周波成分の減衰が大きく情報欠損を生じる。改善法がいくつか提案されているが、それらの手法では骨導音に対する伝播モデルを事前に推定する必要がある。これらの手法の最大の問題点は、伝播モデルパラメータを事前に推定することが困難なことにある。また、雑音の抑制法として、雑音変動のガウス性や白色性を前提とし、しかも信号の線形相関情報のみを利用するウィナーフィルタやLMS（最小二乗法）に基づく適応フィルタが提案されている。しかし、多くの雑音の変動は実際には非ガウス型の複雑な形態を示し、一般には非白色で、現実の信号には高次の相関情報が存在しているなど現実問題との大きな乖離があり、有効な音声抽出法はいまだ見出されていなかった。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、現実の騒音環境下での音声認識を可能にするため、骨導音に対する伝播モデルパラメータを事前に推定する必要がなく、骨導音や気導音、周囲騒音に対する変動のガウス特性に対する前提を必要としない、骨導音と気導音の同時計測に基づく新たな音声信号抽出法を提案した。具体的には、気導音に対しては、音圧の加算性により音声信号と周囲騒音との加法モデルを導入した。一方、骨導音に対しては、音声信号と骨導音との関係を、推定アルゴリズムの簡易化のため、未知パラメータを導入した線形の伝播モデルを用いた。

(2) 周囲の騒音が存在する実環境において、骨導音と気導音の同時逐次観測に基づき音声信号

を抽出するための信号処理法を開発した。具体的には、骨導音と気導音の同時測定値で条件付けられた確率分布に関するベイズ定理に着目することにより、新たな音声信号抽出アルゴリズム（ベイズフィルタ）を提案した。

3. 研究の方法

(1) 骨導音と気導音の同時計測に基づく音声信号抽出アルゴリズム（ベイズフィルタ）の開発

携帯端末やヘッドセットマイクを用い音声のみによりデータ入力を行う必要がある作業現場等に音声認識を応用することを目的とし、周囲環境騒音下で、音声信号の精密な抽出を可能にする新たな実用的手法を開発した。具体的には、周囲騒音の影響を受けにくい骨導音および周囲騒音の影響を受けているが、音声信号に対する全ての周波数成分を保全した気導音の両者の同時計測に基づき音声信号を抽出するための信号処理法について検討を行った。

周囲騒音のような雑音に対する対策法として、ウィナーフィルタやLMS（最小二乗法）に基づく適応フィルタを適用した手法が提案されているが、これらのフィルタは雑音のガウス性や白色性を前提としており、しかも信号の単純な線形相関情報のみを必要とする。多くの雑音変動は非ガウス型の複雑な形態を示し、一般には非白色で、観測される信号には高次の非線形相関が確実に存在している。さらに、従来の多くの手法では、音声信号に対し例えばARモデルのような時系列モデルを導入し、そのパラメータを事前に推定しておくことが必要であるため、実際への適用においては制限となっていた。本研究では、実環境下での音声認識を可能にするため、雑音変動のガウス性や白色性などの前提を必要とせず、しかも信号に関する高次の非線形相関情報をも考慮し、かつ音声の時間的変動形態が未知の場合でも適用できる新たな音声信号抽出法を開発した。

(2) 音声信号抽出アルゴリズム（ベイズフィルタ）の有効性確認

音声認識率の向上や工場等の生産の現場への応用が可能となる音声認識システムを構築し実用化を計るために、研究開発した骨導音および気導音の同時計測に基づくベイズフィルタを、実際の騒音下における音声データに適用し、その実際的な有効性を確認した。

4. 研究成果

(1) 開発した騒音抑制法に対する有効性の確認を行うため、騒音下での音声信号に本手法を適用した。具体的には、女声信号および男声信号それぞれに対し、騒音存在下での骨導音および気導音に対する観測値（サンプリング周波数 10kHz、量子化 16 bits）に基づき、音声信号の逐次推定を行った。

具体的な騒音としては白色雑音、有色雑音（ピンクノイズ）および機械騒音を採用し、広島県立総合技術研究所西部工業技術センターの音響実験棟における無響室で、騒音のない状況において測定した音声信号のみのデータにコンピュータ上で騒音を加算することにより気導音の観測値を作成した。さらに、気導音と同期をとり、振動ピックアップを用いて骨導音を同時測定した。騒音の大きさは、音のエネルギーの尺度で、音声信号の1倍、2倍、3倍、4倍、5倍、および10倍に設定し、あえてS/N比が悪い状況下での観測値にも本手法を適用した。

その結果、気導音のみに基づく推定結果は、骨導音および気導音の両観測に基づく本手法に比べて、特に有色雑音および機械騒音の場合、騒音の影響が十分に除去できていないことが確認された。

(2) 推定結果に対する定量的評価として、次式で定義される二乗平均誤差（RMS Error）およ

び性能評価指標 (PEI, Performance Evaluation Index) を求めた。

$$RMS\ Error = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (x_k - \hat{x}_k)^2, \quad PEI = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum x_k^2}{\sum (x_k - \hat{x}_k)^2} \right)$$

表 1 女声信号に対する評価結果

(a) 白色雑音の場合

S/N Ratio	RMS Error		Performance Evaluation Index	
	Proposed Method	Compared Method	Proposed Method	Compared Method
1/1	0.013895	0.013995	4.0731	4.0105
1/2	0.016238	0.016755	2.7198	2.4474
1/3	0.017471	0.018244	2.0838	1.7078
1/4	0.018304	0.019203	1.6791	1.2628
1/5	0.018892	0.019877	1.4045	0.96327
1/10	0.020323	0.021511	0.77053	0.27713

(b) 有色雑音の場合

S/N Ratio	RMS Error		Performance Evaluation Index	
	Proposed Method	Compared Method	Proposed Method	Compared Method
1/1	0.015180	0.016059	3.3047	2.8154
1/2	0.017486	0.019183	2.0761	1.2719
1/3	0.018699	0.020863	1.4938	0.54265
1/4	0.019338	0.021938	1.2021	0.10616
1/5	0.019811	0.022686	0.99202	-0.18504
1/10	0.020987	0.024414	0.49109	-0.82276

(c) 機械騒音の場合

S/N Ratio	RMS Error		Performance Evaluation Index	
	Proposed Method	Compared Method	Proposed Method	Compared Method
1/1	0.014828	0.018922	3.5083	1.3909
1/2	0.017592	0.022791	2.0424	-0.22529
1/3	0.019537	0.024837	1.1132	-0.97169
1/4	0.020103	0.026115	0.86505	-1.4075
1/5	0.020456	0.026977	0.71357	-1.6899
1/10	0.021072	0.028752	0.47891	-2.2431

表 2 男声信号に対する評価結果

(a) 白色雑音の場合

S/N Ratio	RMS Error		Performance Evaluation Index	
	Proposed Method	Compared Method	Proposed Method	Compared Method
1/1	0.019036	0.019073	4.5388	4.5218
1/2	0.021361	0.022836	3.5380	2.9579
1/3	0.021781	0.024908	3.3688	2.2035
1/4	0.021787	0.026283	3.3662	1.7369
1/5	0.022002	0.027282	3.2812	1.4129
1/10	0.022343	0.029916	3.1472	0.61220

(b) 有色雑音の場合

S/N Ratio	RMS Error		Performance Evaluation Index	
	Proposed Method	Compared Method	Proposed Method	Compared Method
1/1	0.017730	0.022311	5.1560	3.1600
1/2	0.019917	0.026697	4.1449	1.6010
1/3	0.020478	0.029118	3.9046	0.84696
1/4	0.021991	0.030720	3.2856	0.38179
1/5	0.022206	0.031877	3.2009	0.060872
1/10	0.022329	0.034834	3.1527	-0.70972

(c) 機械騒音の場合

S/N Ratio	RMS Error		Performance Evaluation Index	
	Proposed Method	Compared Method	Proposed Method	Compared Method
1/1	0.019172	0.026065	4.4769	1.8092
1/2	0.019757	0.031325	4.2161	0.21255
1/3	0.020262	0.034177	3.9967	-0.54429
1/4	0.020798	0.036012	3.7657	-0.99868
1/5	0.022099	0.037291	3.2428	-1.3018
1/10	0.022310	0.040187	3.1602	-1.9514

表 1 および表 2 より、全ての S/N 比において、骨導音および気導音の観測に基づく本手法 (Proposed Method) は気導音の観測のみに基づくアルゴリズム (Compared Method) に比べて、音声信号を精度よく推定していることが数値的にも確認された。

< 引用文献 >

- A. Ikuta, M. O. Tokhi and M. Ohta, "A Cancellation Method of Background Noise for a Sound Environment System with Unknown Structure," IEICE Trans. Fundamentals, Vol.E84-A, pp.457-466 (2001).
- A. Ikuta, H. Orimoto, "Adaptive Noise Suppression Algorithm for Speech Signal Based on Stochastic System Theory," IEICE Trans. Fundamentals, Vol.E94-A, pp.1618-1627 (2011).
- 生田・肖・折本・長谷川, "骨導音と気導音を用いた非線形適応ノイズキャンセラーによる音声復元," 音講論集, pp.52, (2014.3).
- 川村・藤井・伊藤・副井, "線形予測分析に基づく騒音抑圧法," 電子情報通信学会誌 A, Vol.J85-A, pp.415-423 (2002).
- 中山・石光・中川, "加速度差分を用いた体内伝導音の明瞭化," 信学技報, EA2008-24, pp.39-44 (2008).
- 田宮・島村, "適応フィルタによる骨導音声の音質改善," 信学技報, SP2005-191, pp.41-46, (2006).

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計5件)

- H. Orimoto, A. Ikuta and Y. Xiao: Method for Evaluating the Statistical Relationship between Sound Pressure Level and Noise Annoyance Based on a Nonlinear Regression Model and an Experiment, International Journal of Acoustics and Vibration, Vol. 21, No. 2, pp. 145-151 (2016).
- 生田 顕, 折本寿子: 有限レベル変動域を考慮したファジィ・ベイズフィルタに基づく音環境の一状態推定法, 計測自動制御学会論文集, Vol. 52, No. 7, pp. 385-392 (2016).
- A. Ikuta, H. Orimoto and G. Gallagher: State Estimation for Fuzzy Sound Environment System with Finite Amplitude Fluctuation, Journal of Software Engineering and Applications, Vol. 10, pp. 625-638 (2017).
- H. Orimoto and A. Ikuta: A Bayesian Filter for Sound Environment System with Quantized Observation, Intelligent Information Management, Vol. 10, No. 3, Article ID: 84820, 12 pages (2018).

A. Ikuta, H. Orimoto and G. Gallagher: Noise Suppression Method by Jointly Using Bone- and Air-Conducted Speech Signal, Noise Control Engineering Journal, Vol. 66, No. 6, pp.472-488 (2018).

〔国際会議論文〕(計7件)

H. Orimoto and A. Ikuta: Statistical Faults Diagnosis Method by Using Higher-Order Correlation Information between Sound and Vibration of Rotational Machine, Proceedings of 23th International Congress on Sound and Vibration, 8 pages, (July, 2016).

A. Ikuta: A Bayesian Filter for Sound Environment System with Quantized Observation, Proceedings of INTER-NOISE 2016, 9 pages, (September, 2016).

H. Orimoto and A. Ikuta: State Estimation Method for Sound Environment Based on an Extension Type UKF by Considering Non-Gaussian Noise, Proceedings of 24th International Congress on Sound and Vibration, 8 pages, (July, 2017).

A. Ikuta and H. Orimoto: Noise Suppression Method by Jointly Using Bone- and Air-Conducted Speech Signals, Proceedings of Inter Noise 2017, 8 pages, (August, 2017).

G. Gallagher, A. Ikuta and H. Orimoto: A Countermeasure Method for Background Noise by Jointly Using Bone- and Air-Conducted Speech Signal, Proceedings of 25th International Congress on Sound and Vibration, 8 pages, (July, 2018).

A. Ikuta and H. Orimoto: Fuzzy Bayesian Filter for Sound Environment by Considering Additive Property of Energy Variable and Fuzzy Observation in Decibel Scale, Proceedings of Signal Processing on Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications, pp. 197-202, (September, 2018).

H. Orimoto and A. Ikuta: Noise Cancellation Method for Speech Signal by Using an Extension Type UKF, Proceedings of Signal Processing on Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications, pp. 304-310, (September, 2018).

〔学会発表〕(計7件)

生田 顕, 内藤真央, 久保里奈, 太田光雄: 音環境システムにおける非線形・非ガウス・非定常性を考慮した出力分布予測, 電子情報通信学会応用音響研究会, 2015年11月

下野智也, 生田 顕, 長谷川浩治: 骨導音と気導音の併用による騒音抑制法, 第24回計測自動制御学会中国支部学術講演会, 2015年11月

生田 顕, 折本寿子, G. Gallagher: 量子化観測の音環境システムに対するベイズ論理に基づく状態推定, 電子情報通信学会応用音響研究会, 2016年11月

折本寿子, 生田 顕: 非ガウス性雑音を考慮した拡張型UKFによる状態推定法と音環境への適用, 電子情報通信学会応用音響研究会, 2016年11月

折本寿子, 生田 顕, G. Gallagher: 音環境における非ガウス雑音を考慮した拡張型UKFによる状態推定, 日本音響学会春季研究発表会, 2017年3月

H. Orimoto and A. Ikuta: Fault Diagnosis Method by Using Multinomial Distribution Based on Correlation Information between Sound and Vibration, 日本音響学会秋季研究発表会, 2017年9月

G. Gallagher, A. Ikuta and H. Orimoto: A Noise Suppression Method by Using Bayes' Theorem Based on the Observation of Bone- and Air-Conducted Speech Signals, 日本音響学会秋季研究発表会, 2017年9月

〔図書〕(計1件)

A. Ikuta and H. Orimoto: Static and Dynamic Methods for Fuzzy Signal Processing of Sound and Electromagnetic Environment Based on Fuzzy Observations, "Lecture Notes" in the series "Studies in Computational Intelligence" (SCI) published by Springer-Verlag, Vol. 620, pp. 171-187 (2016).

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 肖 業貴, ローマ字氏名: XIAO Yegui, 所属研究機関名: 県立広島大学, 部局名: 経営情報学部, 職名: 教授, 研究者番号(8桁): 50252325

研究分担者氏名: 折本寿子, ローマ字氏名: ORIMOTO Hisako, 所属研究機関名: 県立広島大学, 部局名: 経営情報学部, 職名: 准教授, 研究者番号(8桁): 80533207