

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：31303

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04040

研究課題名（和文）方向統計学と信号処理の融合による高精度信号マッチングのための基盤技術開拓

研究課題名（英文）Development of fundamental technologies for high accuracy signal matching by fusion of directional statistics and signal processing

研究代表者

八巻 俊輔（Yamaki, Shunsuke）

東北工業大学・工学部・准教授

研究者番号：10534076

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、相関関数を用いた信号マッチング技術に関して、方向統計学の観点から相関関数のさまざまな数学的性質を明らかにした。まず、2信号間のクロスパワースペクトルを確率変数と仮定し、クロスパワースペクトルの変動に対する相関関数の統計的性質の定式化を行った。また、位相スペクトルが角度データであることを考慮した上で、方向統計学の概念に基づく相関関数の統計的解析法を新たに確立した。さらに、信号に白色ガウス雑音が重畳したときの2信号間の相関関数の変動の評価、相関フィルタ理論に基づく相関関数の性能評価、信号マッチング技術のサウンドコラージュ技術への応用などの研究に取り組んだ。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究を通して、相関関数を用いた信号マッチング技術に関して、信号処理に方向統計学の概念を融合させた新たな方法論が確立された。さらに、信号マッチング技術の評価指標が明らかとなり、従来よりも高精度な信号マッチング技術を開発するための方針が得られた。これらの研究成果は、相関関数に限らず信号処理全般・通信技術全般においてきわめて重要な意義をもち、映像の位置ずれ補正やパターン認識、生体認証、通信技術における信号検出の高精度化、サウンドコラージュ技術における信号の類似性の評価等、さまざまな信号処理技術における振幅および位相の数理を根本的に見直すブレークスルーとなる事が期待される。

研究成果の概要（英文）：For signal matching technologies based on correlation functions, we have clarified various mathematical properties of the correlation functions from the viewpoint of directional statistics. We have first formulated statistical properties of the correlation functions under fluctuation of cross-power spectrum between two signals assuming their cross-power spectrum to be random variables. Next, we have newly developed statistical analysis of correlation functions based on directional statistics considering phase spectra to be circular data. Furthermore, we have evaluated fluctuation of the correlation functions between two signals corrupted by white Gaussian noise, and performance of correlation functions based on correlation filter theory. We also have applied the signal matching techniques for sound collage techniques.

研究分野：信号処理

キーワード：方向統計学 信号処理 信号マッチング 相関関数

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

信号マッチングとは、信号間の類似度を評価するための技術であり、生体認証やパターン認識、無線通信、映像の位置ずれ補正、周期性をもつ DNA 配列の探索など、幅広い分野において応用されてきた。この信号マッチングに広く用いられているのが位相限定相関(POC)関数である。POC 関数は、2 つの信号(画像など)が類似していれば鋭いピークをもつことが経験的に知られており、この性質を利用した信号マッチング技術が従来から広く用いられてきた。しかし、従来はこの POC 関数の性質を保証するための理論的な根拠が無く、信号マッチング手法の正当性が保証できなかった。この正当性を保証するためには、2 つの信号の位相スペクトルが POC 関数にどのような影響を与えるのかを明らかにする必要がある。さらに、応用技術としての信号マッチングの精度を高めるために、2 つの信号の類似度を適切に評価できる指標が必要である。

一方で、角度データを統計的に取り扱う学問として、「方向統計学」が近年注目を集めている。方向統計学とは、風向きや渡り鳥の飛び立つ方角、アンテナの指向性、時刻ごとの交通事故の発生件数など、方角や時刻に依存する量を統計的に扱う学問である。この概念は信号マッチング技術にも関連があると考えられる。具体的には、信号の位相を角度データとして捉える事により、方向統計学の概念が信号処理にも応用できることが期待される。

2. 研究の目的

本研究では、「方向統計学」と「信号処理」という異なる学問の融合による高精度信号マッチング技術のための基盤技術開発を行う。方向統計学の概念に基づき、相関関数を用いた信号マッチング技術における振幅および位相の数理を明らかにし、信号マッチング技術に関する理論的な根拠を確立し、相関関数を用いた信号マッチング手法の評価指標を明確化する。さらに、それらの成果を応用し、信号マッチング技術のさらなる高精度化を目的とする。そして、相関関数を用いた信号マッチングに関する新たな方法論が確立されることが期待される。これらの方法論は、相関関数に限らず信号処理全般・通信技術全般においてきわめて重要であり、映像の位置ずれ補正やパターン認識、生体認証、通信技術における信号検出の高精度化など、信号処理における振幅および位相の数理を根本的に見直すブレークスルーとなり得る。

3. 研究の方法

本研究では、(a)方向統計学の考え方にに基づき、相関関数を用いた信号マッチング技術に関する理論的な根拠の確立をめざす。また、相関関数を用いた信号マッチングにおける振幅および位相の数理を明らかにし、(b)相関関数を用いた信号マッチング手法の評価指標を明確化する。さらに、これらの成果の応用として、(c)高精度な信号マッチングのための基盤技術開発を行う。

(a) 方向統計学に基づく相関関数を用いた信号マッチング技術に関する理論的な根拠の確立

2 つの信号の位相スペクトル差が POC 関数に与える影響を方向統計学の概念に基づき理論的に明らかにする。位相スペクトル差をガウス分布に従う確率変数と仮定し、その分散の変化が POC 関数に与える影響を理論的に明らかにする。位相スペクトル差が 0 であるときは、POC 関数はデルタ関数であるが、分散の増加にともない、ピークの値が減少し、サイドローブ値が増加する傾向が実験的に確かめられる。この傾向は、2 信号の類似性が低くなるほど POC 関数のピークが目立たなくなることを示唆している。この現象に関する理論的な根拠を確立することにより、POC 関数を用いた信号マッチング技術の妥当性について明らかにする。また、位相は線形データではなく角度データであるため、トーラス上の確率分布(2 変量 von-Mises 分布など)を仮定し、方向統計学の概念に基づきデータを扱う必要がある。

(b) 相関関数を用いた信号マッチング技術の評価指標の明確化

信号マッチングにおいて、2 つの信号が似ているか否かを判定することが重要であり、実際の生体認証や信号検出などでは、さまざまなノイズや位相の歪みなどが発生する環境で信号の類似性を判定する必要がある。そのため、どの程度のノイズレベルおよび位相の歪みが許容できるのかを明らかにしなければならない。具体的な方法としては、相関関数そのものの確率分布がどのように得られるかを明らかにし、ピークとサイドローブの値を適切に判別するための閾値の決定法を検討する。また、相関フィルタの概念に基づき、相関関数を用いた信号マッチング手法の雑音に対する耐性および相関関数のピークの先鋭度を表す評価指標を導出し、どの程度の雑音レベルが許容できるのかを明らかにする。

(c) 高精度な信号マッチングのための基盤技術開発

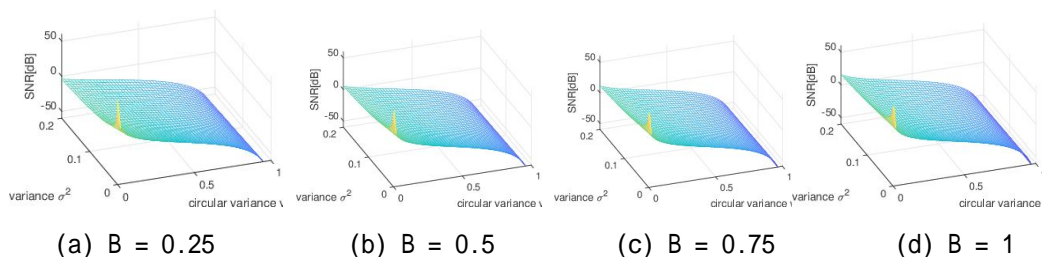
(a)および(b)の研究成果により確立した方向統計学に基づく相関関数を用いた信号マッチング

技術の性能を評価した上で、従来よりも高精度な信号マッチングアルゴリズムの開発をめざす。本研究で明らかとなる相関関数の理論的な性質を考慮し、さらに方向統計学の考え方を新たに導入することにより、振幅および位相の情報を有効に利用した信号マッチングの新しい概念の確立をめざす。さらに、より広義の相互相関関数への拡張や、連続時間信号への拡張など、より広いクラスの信号マッチングに適用可能な基盤技術として体系化することをめざす。

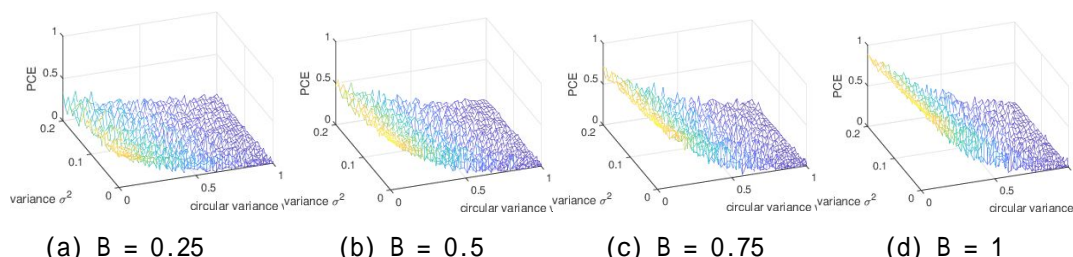
4. 研究成果

令和3年度は、従来行われてきた位相限定相関(POC)関数の統計的解析の結果をより広いクラスの相互相関関数(CC)関数に拡張した。POC関数が2信号間の正規化クロスパワースペクトルの離散フーリエ逆変換として定義されるのに対し、CC関数は、2信号間のクロスパワースペクトルの離散フーリエ逆変換として定義される。信号マッチング技術では、POC関数だけではなく、より広義の一般的なCC関数が用いられることも多い。信号マッチングによく用いられる自然音声や自然画像などの信号のエネルギーは低周波領域に集中していることが多い。そのため本研究では、CC関数は低域に集中する振幅スペクトルをもつと仮定し、2信号間のクロスパワースペクトルの振幅スペクトルと位相スペクトルの両者に統計的な仮定をおいた上で、CC関数の統計的性質を明らかにした。ここで、クロスパワースペクトルに重畳する雑音は、円筒(シリンダー)上の2変量確率分布に従う2変量確率変数としてモデリングしており、振幅に重畳する雑音は線形確率分布に従い、位相に重畳する雑音は円周確率分布に従うものと仮定した。

令和4年度は、相関フィルタの概念に基づき、相関関数を用いた信号マッチング手法の雑音に対する耐性および相関関数のピークの先鋭度を表す評価指標を導出した。従来提案されてきたPOC関数の評価指標をより広いクラスの一般的なCC関数にも適用できるように拡張した。2信号間のクロスパワースペクトルの振幅スペクトルと位相スペクトルの両者に統計的な仮定をおいた上で、CC関数の雑音に対する耐性を表すSNR(Signal-to-Noise Ratio)や、CC関数のピークの鮮鋭度を表すPCE(Peak-to-Correlation Energy)等の指標を導出した。これらの指標は、相関関数を用いた信号マッチング手法の雑音に対する耐性および相関関数のピークの鮮鋭度をそれぞれ表している。これらの指標を導出することにより、信号の帯域変動や雑音重畳に対するCC関数の統計的な傾向を明らかにした。具体的には、振幅スペクトルの分散および位相スペクトルの円周分散、正規化帯域幅をパラメータとしてCC関数のSNRの値を評価した。振幅スペクトルの分散および位相スペクトルの円周分散の増加に対してCC関数の雑音エネルギーが増加するため、SNRは減少傾向にあることを明らかにした。また、正規化帯域幅の増加に伴い、信号エネルギーが増加するため、SNRは増加傾向にあることを明らかにした。同様に、振幅スペクトルの分散および位相スペクトルの円周分散、正規化帯域幅をパラメータとしてCC関数のPCEの値を評価した。振幅スペクトルの分散および位相スペクトルの円周分散の増加に対してCC関数の雑音エネルギーが増加するため、PCEは減少傾向にあることを明らかにした。これは、CC関数の雑音エネルギーの増加に伴い、ピークが雑音に埋もれていき、その鋭さが減少していくことを意味している。また、正規化帯域幅の増加に伴い、PCEは増加傾向にあることがわかる。これは、信号エネルギーの増加に伴い、CC関数のピークの鋭さが増加していくことを意味している。



(a) $B = 0.25$ (b) $B = 0.5$ (c) $B = 0.75$ (d) $B = 1$
 図1 CC関数のSNR (Signal to Noise Ratio) の挙動
 (σ^2 : 振幅スペクトルの分散, ν : 位相スペクトルの円周分散, B : 正規化帯域幅)



(a) $B = 0.25$ (b) $B = 0.5$ (c) $B = 0.75$ (d) $B = 1$
 図1 CC関数のSNR (Signal to Noise Ratio) の挙動
 (σ^2 : 振幅スペクトルの分散, ν : 位相スペクトルの円周分散, B : 正規化帯域幅)

令和 5 年度は、信号マッチング技術をサウンドコラージュ技術に応用できる可能性を検討した。サウンドコラージュとは、要素音から目的音を表現するサウンドエフェクトを実現する音質変換技術である。このサウンドコラージュでは、NMF (Non-Negative Matrix Factorization: 非負値行列因子分解) を用いて要素音および目的音のスペクトログラムを基底行列と係数行列の積で近似する。NMF によるサウンドコラージュの原理を図 3 に示す。基底行列は音の周波数スペクトルを表し、係数行列は時間ごとの重み付けを表す。NMF を用いたサウンドコラージュにより、要素音から目的音を近似した出力スペクトログラムが得られる。ここで、出力音と目的音のスペクトログラムの類似性を評価する必要があるため、方向統計学と信号処理を融合した信号マッチング技術が応用できる可能性が見出された。

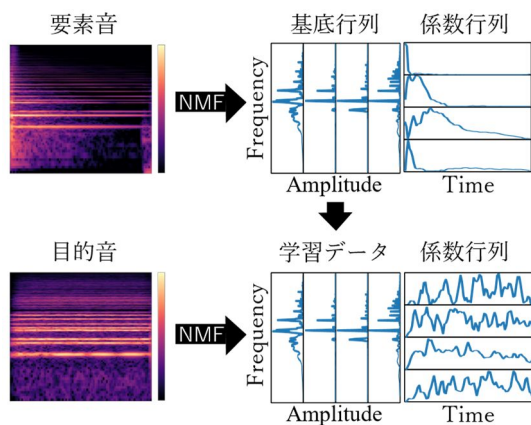


図 3 NMF によるサウンドコラージュの原理

研究期間全体を通して、2 信号間のクロスパワースペクトルを 2 変量確率変数と仮定した場合の相関関数の統計的性質の定式化、信号に白色ガウス雑音を重ねたときのスペクトル変動に対する相関関数の変動の評価、相関フィルタ理論に基づく相関関数の性能評価、信号マッチング技術のサウンドコラージュ技術への応用などの研究に取り組み、相関関数を用いた信号マッチング技術に関して、方向統計学の観点からさまざまな理論構築を行い、それらの数学的性質を明らかにした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 YAMAKI Shunsuke, FUKUI Kazuhiro, ABE Masahide, KAWAMATA Masayuki	4. 巻 E104.A
2. 論文標題 Statistical Analysis of Phase-Only Correlation Functions under the Phase Fluctuation of Signals due to Additive Gaussian Noise	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 671 ~ 679
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transfun.2020EAP1024	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 白井 海音, 八巻 俊輔
2. 発表標題 NMFを用いたサウンドコラージュの基底数と要素音数に関する研究
3. 学会等名 令和6年東北地区若手研究者研究発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 八巻 俊輔
2. 発表標題 相関フィルタ理論に基づく相互相関関数の統計的性質
3. 学会等名 電気学会システム研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shunsuke Yamaki, Shuntaro Seki, Norihiro Sugita, and Makoto Yoshizawa
2. 発表標題 Performance Evaluation of Cross Correlation Functions Based on Correlation Filters
3. 学会等名 2021 20th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計3件

1. 著者名 樋口龍雄、阿部 正英、八巻俊輔、川又政征	4. 発行年 2021年
2. 出版社 森北出版	5. 総ページ数 256
3. 書名 Python対応 デジタル信号処理	

1. 著者名 樋口龍雄、川又政征、阿部正英、八巻俊輔	4. 発行年 2021年
2. 出版社 森北出版	5. 総ページ数 248
3. 書名 MATLAB対応 デジタル信号処理（第2版）	

1. 著者名 電気学会・デジタル信号処理システム最適化技術調査専門委員会	4. 発行年 2021年
2. 出版社 オーム社	5. 総ページ数 282
3. 書名 デジタル信号処理におけるシステム最適化技術	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------