

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 19 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420336

研究課題名(和文) 方向統計学と位相限定相関関数に基づく高精度信号マッチングのための技術開発

研究課題名(英文) Development of technologies for high accuracy signal matching based on directional statistics and phase-only correlation functions

研究代表者

八巻 俊輔 (Yamaki, Shunsuke)

東北大学・サイバーサイエンスセンター・助教

研究者番号：10534076

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、位相限定相関(POC: Phase-Only Correlation)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POC関数のさまざまな数学的性質を明らかにした。まず、2信号の位相スペクトルを2変量確率変数と仮定した場合のPOC関数の統計的性質の定式化を行った。次に、信号に白色ガウス雑音を重ねたときの位相スペクトル変動に対するPOC関数の変動の評価を行った。さらに、POC関数のピークとサイドローブを判別するための基準を与えるため、位相スペクトル差を確率変数と仮定した場合のPOC関数の確率密度関数の導出を行った。

研究成果の概要(英文)：For signal matching technologies based on Phase-Only Correlation functions, we have clarified various mathematical properties of the POC functions from the viewpoint of directional statistics. We have first formulated statistical properties of the POC functions between two signals assuming their phase-spectra to be bivariate random variables. Next, we have evaluated fluctuation of the POC functions between two signals corrupted by white Gaussian noise. Furthermore, in order to give some criteria for discriminant between the peak and sidelobe in the POC functions, we have derived probability density functions of the POC functions with stochastic phase-spectrum differences.

研究分野：工学

キーワード：位相限定相関関数 方向統計学 信号マッチング

1. 研究開始当初の背景

信号マッチング技術は、2つの信号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、古いフィルム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技術に広く用いられているのが位相限定相関(POC: Phase-Only Correlation)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いる。この経験的な事例に基づき、POC関数による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、このPOC関数の性質を保証するための理論的な根拠が全くなく、経験的事例のみに基づいてこれまで用いられてきたのが現状である。この理論的な根拠なくしては、信号マッチング技術の正当性および妥当性が保証できない。そのため、この信号マッチング技術の正当性および妥当性を示すために、2つの信号の位相スペクトルがPOC関数に与える影響およびPOC関数の統計的性質を理論的に示すことが必要である。

2. 研究の目的

本研究では、POC関数を用いた信号マッチング技術の理論的な妥当性および性能限界を明らかにする。さらに、方向統計学という新しい考え方に基づくPOC関数の統計的解析法の確立をめざす。POC関数は、生体認証やパターン認識、画像の位置ずれ補正などの信号マッチングの分野で幅広く用いられてきた。しかし、POC関数の理論的な性質が明らかでないまま、経験的事例のみに基づいて使われているのが現状であり、信号マッチングにPOC関数を用いるのが妥当であることの理論的な根拠がない。そこで、POC関数の理論的性質を根本的に見直し、これまで経験的に知られてきた性質に対して理論的な根拠を与えることにより、POC関数を用いた信号マッチングが適用できる範囲を明確化する

ることを目標とする。

本研究において、POC関数の性質を理論的に明らかにすることは、これまで経験的にしか知られていなかった事例に対して、理論的な根拠を与えられるという点で大変重要な意義をもつ。さらに、本研究では新たに「方向統計学」の考え方を導入して、これまでとは異なる視点からPOC関数の理論解析を行い、異なる学問分野との融合によって新しい独創的な理論を確立することをめざしている。この理論に基づいた信号マッチング技術の確立により、画像の位置ずれ補正やパターン認識、生体認証などの高精度化・高速化が可能になり、通信技術における信号検出などへの応用も期待される。

また、方向統計学およびPOC関数を用いた信号マッチング技術の性能限界が明らかになれば、POC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。信号の位相情報は、POC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る。方向統計学の概念の導入により、信号処理における位相スペクトルのあつかい方を根本的に見直すためのブレークスルーが得られ、位相情報を処理するための新たな概念が確立されることが期待される。

3. 研究の方法

(1) POC関数を用いた信号マッチング技術に対する理論的な根拠の確立

POC関数は、2つの信号の位相スペクトルが等しければデルタ関数となる。しかし、実際の信号マッチングの場面において2つの信号の位相スペクトルが等しくなることはほとんどないため、2つの信号の位相スペクトルが等しくないときにPOC関数がどのような関数になるかを明らかにしなければならない。位相スペクトル差が0であるときにはPOC関数はデルタ関数であるが、位相スペク

トル差の分散が増加するにともない、ピークの値が減少し、ピーク以外の値が増加する傾向が実験的に確かめられている。この傾向は、2つの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が、理論的な根拠にもとづくものではない。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。

(2) 方向統計学にもとづくPOC関数の新しい概念の構築

「方向統計学」とは、風向きやアンテナの指向性、時刻毎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。これらの統計量は、単なる数直線上の数値データではなく、方向の情報をもつ角度データと考えることができる。一般の統計学では、統計量を数直線上の線形データとして考えるのに対し、方向統計学では、統計量を円周上の角度データとして考える。POC関数を用いた信号マッチング技術に、この概念を新たに適用することを考える。

POC関数を用いた信号マッチングにおいて、信号の位相スペクトルが重要である。従来は、位相スペクトルは線形データとして扱われてきたが、この位相スペクトルは角度のデータであるため、方向統計学の考え方で扱わなければならない。具体的には、信号の位相スペクトルの確率分布として円周確率分布を仮定して解析を行う必要がある。方向統計学の概念を導入することにより、これまでとは違った観点でPOC関数を解析することが可能になる。

(3) POC関数による信号マッチングの性能限界の評価

実際の生体認証や信号検出などでは、さまざまなノイズ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

度のノイズレベルが許容できるのかを理論的に明らかにしなければならない。例えば、位相スペクトル差の分散の許容値を理論的に明らかにできれば、POC関数を用いた信号マッチングで許容できるノイズレベルの指標が得られる。POC関数の確率分布から、ピークとサイドローブを判別するための指標を導出し、POC関数を用いた信号マッチングが適用できる範囲の明確化をめざす。

4. 研究成果

(1) 平成26年度

平成26年度は、まず位相スペクトル差がvon-Mises分布に従う場合のPOC関数の統計的性質を明らかにした。von-Mises分布は、方向統計学の分野で広く用いられる代表的な円周確率分布のひとつであり、その確率密度関数は図1に示されている。von-Mises分布の集中度パラメータの増加に伴い、POC関数のピークの期待値は単調増加し、分散は単調増加することを示した。この成果は、これまで経験的に知られてきたPOC関数の統計的性質について、理論的な根拠を与えている。

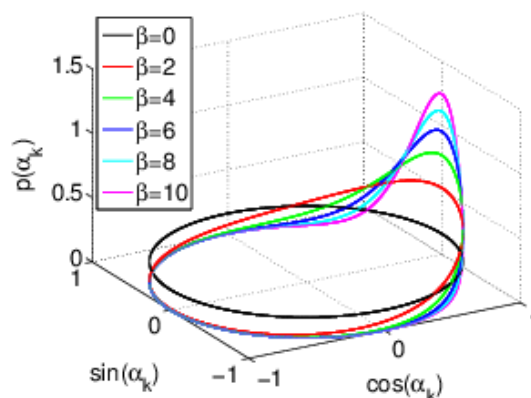


図1 円周確率分布の例(von-Mises分布)

さらに、光ファイバのような非線形位相特性をもつ伝送路を想定し、位相スペクトル差が2次位相CAZAC系列としてモデル化される場合のPOC関数の統計的性質を明らかにした。POC関数の形状がCAZAC系列のパラメータの組み合わせに依存し、複数ピークをもつ場合があることを示した。

(2) 平成 27 年度

平成 27 年度は、2 信号の位相スペクトルがいずれも確率的に変動する場合を想定し、2 信号の位相スペクトルを 2 変量確率変数と仮定した場合の POC 関数の統計的性質を定式化した。まず、位相スペクトルが 2 変量角度データであることを考慮し、方向統計学の概念に基づき、トーラス上の確率分布として 2 変量巻き込み正規分布を定義し、POC 関数の統計的性質を定式化した。さらに、これらの成果を任意の 2 変量確率密度関数に適用できるように拡張し、2 変量特性関数を用いた POC 関数の期待値と分散の一般式を導出した。トーラス上で定義される 2 変量確率密度関数は図 2 に示されている。これらの結果により、正規分布に限らずあらゆる 2 変量確率分布に従う位相スペクトルに関して、2 信号の位相スペクトルの変動に対する POC 関数の統計的性質を定式化した。

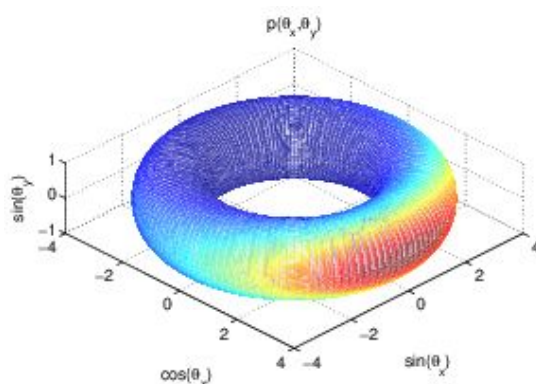


図 2 トーラス上で定義される 2 変量確率密度関数

さらに、信号に白色ガウス雑音为重畳したときの信号の位相スペクトルの変動を定式化し、その位相スペクトル変動が POC 関数に与える影響を評価した。まず、単一正弦波に白色ガウス性雑音为重畳した場合について、位相スペクトルの確率密度関数を導出し、POC 関数の統計的性質を定式化した。また、正弦波の線形結合で表される信号についても、単一正弦波の場合の結果の自然な拡張と

して記述できる事を示した。原信号と雑音重畳後の信号との間の POC 関数の統計的性質を解析し、原信号の振幅スペクトルに対する雑音の分散が大きい周波数成分ほど、位相差の変動が大きくなることを数学的に示した。

(3) 平成 28 年度

平成 28 年度は、POC 関数の確率分布を導出し、POC 関数のピークとサイドローブを区別するための閾値を適切に決定するための理論構築をめざした。このことは、POC 関数を用いた信号マッチングの性能限界の評価に必要である。従来は、POC 関数の期待値と分散を求めていただけであったが、信号マッチング技術において、2 つの信号が似ているか似ていないかを判定するためには、POC 関数のピークとサイドローブの確率分布を明らかにし、それら両者が明確に区別できる範囲を求める必要がある。ピークとサイドローブの確率分布から両者を区別するためのしきい値を決定する方法の例を図 3 に示している。

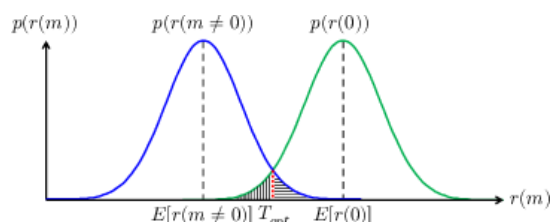


図 3 POC 関数のピークとサイドローブの判別のためのしきい値の決定方法

具体的な方法として、2 つの信号の位相スペクトル差を正規分布に従う確率変数であると仮定し、POC 関数の確率密度関数を理論的もしくは数値的に導出し、実験値と比較することによってその正当性を示した。今後の課題として、POC 関数を用いた信号マッチング技術の雑音に対する耐性を表す評価指標を導出し、どの程度の雑音が許容できるかを明確化することが必要とされる。

(4) 研究成果のまとめ

研究期間全体を通して、2 信号の位相スペクトルを 2 変量確率変数と仮定した場合の POC 関数の統計的性質の定式化、信号に白色ガウス雑音が重畳したときの位相スペクトル変動に対する POC 関数の変動の評価、位相スペクトル差を確率変数と仮定した場合の POC 関数の確率密度関数の導出などの研究に取り組み、POC 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

(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 4 件)

1. S. Yamaki, M. Abe, and M. Kawamata, "Statistical Analysis of Phase-Only Correlation Functions between Real Signals with Stochastic Phase-Spectrum Differences," IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 査読有, vol. E100-A, no. 5, pp. 1097-1108, May 2017. (DOI: 10.1587/transfun.E100.A.1097)
2. S. Yamaki, M. Abe, and M. Kawamata, "Conjecture on the Absence of Limit Cycles in Second-Order Digital Filters with Minimum L_2 -Sensitivity Subject to L_2 -Scaling Constraints," Journal of Signal Processing, 査読有, vol. 21, no. 2, pp. 47-51, Mar. 2017.
3. S. Yamaki, M. Abe, and M. Kawamata, "Statistical Analysis of Phase-Only Correlation Functions with Phase-Spectrum Differences Following Wrapped Distributions," IEICE Transactions on Fundamentals of

Electronics, Communications and Computer Sciences, 査読有, vol. E99-A, no. 10, pp. 1790-1798, Oct. 2016. (DOI: 10.1857/transfun.E99.A.1790)

4. S. Yamaki, M. Abe, and M. Kawamata, "Statistical Analysis of Phase-Only Correlation Functions Based on Directional Statistics," IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 査読有, vol. E97-A, no. 12, pp. 2601-2610, Dec. 2014. (DOI: 10.1857/transfun.E97.A.2601)

[学会発表](計 16 件)

1. S. Yamaki, R. Suzuki, M. Kawamata, and M. Yoshizawa, "Statistical Analysis of Phase-Only Correlation Functions Between Two Signals with Stochastic Bivariate Phase-Spectra," APSIPA Annual Summit and Conference, Dec. 15, 2016, Jeju, Korea.
2. 八巻俊輔, 阿部正英, 川又政征, 吉澤誠, "[招待講演] 方向統計学の観点から見る位相限定相関関数の統計的解析法," 2016 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2016 年 9 月 21 日, 北海道大学(北海道・札幌市)。
3. 八巻俊輔, 鈴木亮, 川又政征, 吉澤誠, "位相スペクトルが 2 変量巻き込み分布に従う場合の方向統計学に基づく位相限定相関関数の統計的解析," 電子情報通信学会第 30 回信号処理シンポジウム, 2015 年 11 月 4 日, スパリゾートハワイアンズ(福島県・いわき市)。
4. 鈴木亮, 八巻俊輔, 川又政征, 吉澤誠, "2 変量確率分布に従う位相スペクトルをもつ 2 信号間の位相限定相関関数の統計的性質," 電子情報通信学会第 30 回信号処理シンポジウム, 2015 年 11 月 4 日,

- スパリゾートハウイアンズ(福島県・いわき市)。
5. 福井一弘, 八巻俊輔, 阿部正英, 川又政征, "白色ガウス雑音に起因する位相差の変動を持つ実信号の位相限定相関関数の統計的解析," 2015年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2015年9月8日, 東北大学(宮城県・仙台市)。
 6. 鈴木亮, 八巻俊輔, 川又政征, 吉澤誠, "位相スペクトルが巻き込み2変量正規分布に従う2信号間の位相限定相関関数の統計的解析," 2015年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2015年9月8日, 東北大学(宮城県・仙台市)。
 7. 福井一弘, 八巻俊輔, 阿部正英, 川又政征, "白色ガウス雑音に起因する位相差の変動を持つ複素信号間の位相限定相関関数の統計的性質," 平成27年度電気関係学会東北支部連合大会, 2015年8月28日, 岩手県立大学(岩手県・滝沢市)。
 8. 鈴木亮, 八巻俊輔, 川又政征, 吉澤誠, "2信号の位相スペクトルが2変量正規分布に従う場合の位相限定相関関数の統計的性質," 平成27年度電気関係学会東北支部連合大会, 2015年8月28日, 岩手県立大学(岩手県・滝沢市)。
 9. 八巻俊輔, 川又政征, "巻き込み分布に従う位相スペクトル差をもつ信号間の位相限定相関関数の統計的性質," 第7回コンピュータショナル・インテリジェンス研究会, 2015年5月30日, 東北大学(宮城県・仙台市)。
 10. 福井一弘, 八巻俊輔, 阿部正英, 川又政征, "白色ガウス雑音による信号の位相変動を考慮した位相限定相関関数の統計的解析," 計測自動制御学会第294回研究集会, 2015年5月29日, 岩手大学(岩手県・盛岡市)。
 11. 鈴木亮, 八巻俊輔, 川又政征, 吉澤誠, "巻き込み2変量正規分布に従う位相スペクトルをもつ2信号間の位相限定相関関数の統計的性質," 計測自動制御学会第294回研究集会, 2015年5月29日, 岩手大学(岩手県・盛岡市)。
 12. 八巻俊輔, 川又政征, "von-Mises分布に従う位相スペクトル差をもつ実信号間の位相限定相関関数の統計的解析," 電子情報通信学会第29回信号処理シンポジウム, 2014年11月14日, コミュニティ嵯峨野(京都府・京都市)。
 13. S. Yamaki, M. Abe, and M. Kawamata, "Conjecture on the Absence of Limit Cycles in Second-Order Digital Filters with Minimum L_2 -Sensitivity Subject to L_2 -Scaling Constraints," IEEE 4th International Conference on Network Infrastructure and Digital Content, Sept. 21, 2014, Beijing, China.
 14. 八巻俊輔, 阿部正英, 川又政征, "von-Mises分布に従う位相スペクトル差をもつ実信号間の位相限定相関関数," 平成26年度電気関係学会東北支部連合大会, 2014年8月21日, 山形大学(山形県・米沢市)。
 15. 福井一弘, 八巻俊輔, 阿部正英, 川又政征, "2つの信号の位相差が2次位相CAZAC系列の場合の位相限定相関関数," 平成26年度電気関係学会東北支部連合大会, 2014年8月21日, 山形大学(山形県・米沢市)。
 16. 八巻俊輔, 阿部正英, 川又政征, "方向統計学を用いた位相限定相関関数の統計的性質の記述," 第89回ニューパラダイムコンピューティング研究会, 2014年6月25日, 山梨大学(山梨県・甲府市)。
6. 研究組織
 (1) 研究代表者
 八巻 俊輔 (YAMAKI SHUNSUKE)
 東北大学・サイバーサイエンスセンター・助教
 研究者番号: 10534076