

令和 2 年 6 月 12 日現在

機関番号：82636

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K00358

研究課題名(和文) ベイズ推定による位相アンラッピングの高速高精度化と屋内測位への応用

研究課題名(英文) Improvement of accuracy and speed in phase unwrapping by Bayes inference with application to the indoor positioning

研究代表者

梅原 広明 (Umehara, Hiroaki)

国立研究開発法人情報通信研究機構・脳情報通信融合研究センター脳情報工学研究室・研究マネージャー

研究者番号：60358942

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)：精密な測位では電波の(受信する際の振幅や到来時間ではなく)位相角情報を用いる。電波は振幅と位相角で表されるが、位相角は距離に換算する際の精密な目盛りに対応するからである。しかし、この目盛りは1波長の距離になるとゼロに戻り計測値が1波長までの値にくるまってしまいうため、値を延ばし戻すアンラップの変換が必要となるが、計測値にノイズが含まれる場合等では、変換に1対多の関係があるためそのままでは一意に値を決めることが難しい。そこで、位置・速度・加速度のいずれかが連続して変化する、という事前情報を含めたベイズ推定モデルを導き、得られる確率分布を逐次近似することで、高精度かつ高速な推定を実現させた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

位置情報の利活用が進む中、人工衛星を用いた広域的な測位(GNSS)だけでなく、衛星電波が届かない屋内等でGNSSに頼らない精密測位技術の確立が望まれている。しかし、そこで必要となる位相角の高精度なアンラップが難しい。計測される位相角にはノイズが含まれているが、既存のアンラップ法はノイズが無いことを前提としている。また、屋内では、GNSSで行われているような衛星軌道情報を活用したアンラップ法を適用することができない。本研究ではこのような限られた現状でも打開することのできる推定方法を開発した。

研究成果の概要(英文)：Precise positioning uses phase angle information of the radio wave from a reference point. The radio wave is represented by the amplitude and the phase angle, and only the phase angle corresponds to a precise scale for converting a distance. This scale, however, returns to zero at a distance of 1 wavelength, meaning that the measured value is wrapped within a 1 wavelength. It is necessary to unwrap the value by the one-to-many transformation, where the value is not determined uniquely if the data is noisy. Therefore, we formulated the unwrapping estimation model by a Bayesian inference scheme with including a priori information that either position or velocity or acceleration changes continuously. Finally, we realized both precise and fast estimation with approximation of the probability distributions obtained sequentially.

研究分野：ソフトコンピューティング

キーワード：逐次ベイズフィルタ マルコフ場確率モデル 角度統計 整数不確定性 搬送波位相測距

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

精密測位や合成開口レーダ画像解析等の電磁波を活用した計測や撮像は、時空情報や形状情報を正確に把握して安全・安心な生活の質を維持・向上させるための不可欠な技術となっている。移動物体の位置を計測する技術としては、全地球航法衛星システムの外に、衛星電波が届かない屋内空間等における無線センサネットワークによる測位システムがあり、測位の高精度化と高速化をはかる研究が行われている。この場合、携帯機器や小型無人航空機等を対象とする場面が多く、重量・計算負荷ともに軽い性能が求められることから、単純な手法で高精度の位置を検出するニーズが強い。しかし、簡易な機器から得られる狭帯域1次元位相の時系列データは、単純であるがために整合性を図る手がかりが乏しくなり解決策を講ずることが難しい。

2. 研究の目的

測位の原理は測角と測距に二分されるが、いずれも高精度の位置決めを狙うには、電波の強度や到来時間差ではなく位相角を扱う。しかし、位相を用いた測角・測距では、計測対象の方位角や距離が、計測される位相角の多価関数となっていることが問題となる。計測される位相角が主値域 $(-\pi, \pi]$ のみに限られてしまい、主値域幅 2π の整数倍を加えるアンラップが必要になる。この整数値には、計測だけでは一意に決めることができない不定性がある。広く使われている Itoh (1982) による位相アンラップ法 (以下、Itoh アンラップ法と呼ぶ) は、1時刻前との真値差分が π 未満になるように真値をつないでいく操作である。これは、各時刻の真値候補がその時刻での計測値に 2π の整数倍が加えられた値に限られているとして、1時刻前の真値に近い真値候補を選んでいくことに相当する。すなわち、観測ノイズが無いことを仮定しているため、観測ノイズがあるデータでは正確に求めることが難しい場合がある。そこで、本研究では、ノイズを分離ないし低減させながら位相アンラップを行うベイズ推定モデルを構成する。

3. 研究の方法

実施当初は、不連続遷移も含めたラインプロセスによる脳波ベイズ推定モデル (本研究分担者等, Naruse et al., 2013, が確立させていたもの) を、真値候補から最尤真値を推定する際の整数値が遷移する状況に適用することを考えていた。ラインプロセスは事前分布が真値時系列のマルコフ連鎖が途切れる遷移時刻も含めて最尤推定を行う方法である。しかし、位相アンラップの場合、不連続遷移は真値ではなく計測値に起こるため、状況が異なっていた。一方、角度変数からなる時系列データのノイズ除去を行った先行研究 (Traa and Smaragdis, 2013) があることを見つけた。そこで、本研究では Traa and Smaragdis の推定モデルを基にして位相アンラップに適用することができるように改修する方針に切り替えた。

なお、先行研究では、真値が角度統計に基づく確率分布の一つである「くるまれたガウス分布」(wrapped Gaussian distribution) に従うと仮定していた。無限長の区間を持つガウス分布に従う確率変数を主値域にくるんだ確率分布、すなわち、主値域幅で切り刻み、主値域に重ね足し合わせた確率分布である。また、計測値も真値である角度変数にガウス分布の観測ノイズが加わり、くるまれたガウス分布に従う、つまり、事前分布も尤度関数もくるまれたガウス分布に従うと仮定していた。事前分布・尤度関数からベイズ公式を用いて周辺事後確率分布、すなわち、観測データを与えた際に過去の真値が何であれ各時刻に対する真値の確率分布を1時刻前の周辺事後確率分布から求める推定モデルを構成し、真値の最尤推定を行っていた。なお、くるまれたガウス分布の尤度関数は、真値を確率変数とみなす場合には無限和の混合ガウス分布であるため、周辺事後確率分布も混合ガウス分布となる。

4. 研究成果

(1) 角度の主値を推定する先行研究では、ハイパーパラメータ、すなわち、推定モデルを構成する上で必要となったパラメータ (観測ノイズの分散値と真値の滑らかさを仮定する分散値) を推定していなかったため、どのようなハイパーパラメータ値で推定した結果が最尤であるかは未解決のままであった。我々は、まず、先行研究の推定モデルにハイパーパラメータも推定するアルゴリズムを導いた。周辺尤度の最尤推定、すなわち、真値が何であれ最尤となるハイパーパラメータ値を推定してから、そのハイパーパラメータ値を用いて真値の周辺事後確率分布を求め最尤推定を行った。模擬的な1次元角度時系列値にガウス分布に従う観測ノイズを加え主値域にくるんだ人工データから真値を推定した結果、ハイパーパラメータ値も含め適正に推定されたことを確認した。なお、周辺化 (積分) の際には単純な区分求積を行った。

(2) 先行研究の方法を基に位相アンラップの推定モデルを構成した。尤度関数は(1)と同じく、くるまれたガウス分布に従うと仮定し、事前分布の方は、真値が無限長の定義域をもつ線上にあり1時刻前の真値とほぼ同じであると仮定した。すなわち、とある時刻の真値は1時刻前の真値にガウス揺らぎを加えて得られると仮定した。ハイパーパラメータも(1)と同じ手法で周辺尤度を求め最尤推定を行った。模擬的な1次元測距データを位相の主値域内に包めノイズを加えた時系列から推定した結果、ノイズ低減させながらの位相アンラップに成功した。また、本研究で構成した推定モデルが Itoh アンラップ法を拡張していることを確かめるために、Itoh アンラップ法に等価となるハイパーパラメータ値があるかどうかを解析的に調べた。Itoh アンラップ法がノイズ低減機能を有しないため、観測ノイズ分散値をゼロとみなすことが必要であることは想定されるが、それだけでは等価にならず、事前分布の分散値がゼロに近い極限下での

み等価になった。逆にいえば、観測ノイズが小さい場合においても、本研究の推定モデルは Itoh アンラップ法よりも真値の時間変動が大きくなる場合においても適応しうることを示した。

(3) しかし、(2) で構成した推定モデルの事前分布は真値がブラウン運動であることを仮定したことに相当するため、移動物体測位で頻出するような長時間にわたる有指向的な変動の適応性は低いことが予想される。そのような長期的傾向変動にも適用できるように推定モデルを改良した。真値の1階差分がガウス分布に従うと仮定していた事前分布に対して、真値の n 階差分がガウス分布に従う事前分布に拡張した。例えば、 $n = 2$ の場合は真値の速度が1時刻前の値にほぼ等しいと仮定し、 $n = 3$ の場合は加速度が1時刻前の値にほぼ等しいと仮定していることに相当する。尤度関数の方は(1)及び(2)からの変更はない。事前分布に含ませた差分階数 n も推定を行い最尤のモデルを選択する。すなわち、ハイパーパラメータを推定するための周辺尤度の分布を各 n に対して求め、その分布をハイパーパラメータ空間で周辺化した値が最大となる n を探す。最尤の n が求めれば、その n に対して周辺尤度が最大となるハイパーパラメータを推定値とし、そのハイパーパラメータで真値変数の周辺事後確率分布を求め、その最大点を真値の最尤値とする。構成した推定モデルを用いて、 $n = 1, 2$ もしくは 3 を仮定した事前分布に従う真値を生成し観測ノイズを加えるめた人工データから、階数 n も含めて推定し、正しい階数 n で推定された位相値は他の階数による推定値に比べ推定精度が向上する、という結果を得た。なお、周辺事後確率分布の確率変数は(2)の場合には1個で済んだが、この場合には直近の n 個を必要とする。すなわち、 n 次元の確率分布を扱うため、階数推定やハイパーパラメータ推定において各時刻での確率変数の周辺化を行う際に、区分求積では区分したビン数の n 乗だけ計算時間を要してしまう。そこで、モンテカルロ的に積分を行った。すなわち、パーティクルフィルタに仕立てた。この場合、計算時間は n 倍程度で済む。

(4) とはいえ、計算速度が抜本的に速くなったとはいえない。そこで、確率分布が混合ガウス分布になる際に、最高峰の正規分布のみを残し他を無視する近似を施した。これにより、各時刻での周辺事後分布が正規分布であると近似することができるため、カルマンフィルタのように、各時刻での正規分布の平均値・分散値を推定するパラメトリックモデルに仕立てた。推定精度は厳密解法に比べ劣るが実用上遜色のない範囲に収まり、推定計算を高速化させることができた。なお、 $n = 1$ 及び観測ノイズ分散値がゼロに限定した場合には、この近似解法は Itoh アンラップ法と等価になる。

(5) 本研究の分担者(志賀)等が既に開発していた無線双方向時刻比較装置に対して、2機間の搬送波位相時系列を記録するシステムを開発し、精度検証のためレーザー測距計も備えた。歩行移動に対する位置推定の実験を行い(4)の方法で推定した結果、大域的には Itoh アンラップ法と比べ推定精度を向上させることができた。しかし、レーザー測距計の結果と比べると、精度が不十分な区間、あるいは、位相アンラップでは解決することのできない誤差も散見され、計測機の配置に特化した推定モデルの作りこみを行うことが今後の課題となったが、本研究ではそのための基礎技術を確立させた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 Umehara Hiroaki, Okada Masato, Naruse Yasushi	4. 巻 87
2. 論文標題 Sequential Bayesian Filters for Estimating Time Series of Wrapped and Unwrapped Angles with Hyperparameter Estimation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 034005 ~ 034005
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSJ.87.034005	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 -

1. 著者名 梅原広明, 岡田真人, 成瀬康	4. 巻 -
2. 論文標題 円周統計と長期的傾向変動を考慮した逐次ベイズフィルタによる位相アンラップ	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電子情報通信学会和文論文誌A	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 梅原広明, 岡田真人, 成瀬康
2. 発表標題 高次マルコフ連鎖の逐次ベイズフィルタによる位相時系列アンラッピング
3. 学会等名 電子情報通信学会・複雑コミュニケーションサイエンス研究会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔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
研究分担者	成瀬 康 (Naruse Yasushi) (00455453)	国立研究開発法人情報通信研究機構・脳情報通信融合研究センター脳情報工学研究室・室長 (82636)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	志賀 信泰 (Shiga Nobuyasu) (50536050)	国立研究開発法人情報通信研究機構・電磁波研究所時空標準 研究室・主任研究員 (82636)	