

## 論文内容の要旨

博士論文題目

実環境における実時間状態推定のための適応的サンプリング法

氏名

坂東 誉司

直接観測することの出来ない隠れ状態の逐次推定問題に対して、時系列ベイズ推定法が近年広く適用され、その有効性が示されてきた。ただし、時系列ベイズ推定法は計算困難な隠れ状態についての積分を含むため、隠れ状態が連続変数である場合には何らかの近似が用いられることが一般的である。本論文では非ガウス、非定常な雑音の存在する実環境における実時間状態推定問題として、実環境における実時間視覚追跡課題を扱う。このような問題には、先述の積分をサンプル近似したパーティクルフィルタ (PF) が広く用いられてきたが、その推定精度、計算時間はサンプル数についてトレードオフの関係にある。更に問題が高次元の状態推定問題となる場合には、推定精度を維持するためには大量のサンプルが必要となり、実時間での状態推定の実現は非常に困難な課題となる。

この点は PF の中心的な問題点として様々なサンプリング法を用いた改善手法が提案されてきた。実時間視覚追跡システムの様に準備することのできるサンプル数が少数に制限される場合には特に、システムの推定精度は採用するサンプリング手法によって大きな影響を受けるため、各種サンプリング法を利用した手法が提案され、その性質も実験的に調べられてきた。しかし、実環境においては環境や対象のモデル化の際に誤差が存在することが普通であり、単一のサンプリング法を利用した場合、とりわけ準備できるサンプル数が少数の場合には、このモデル化誤差がサンプリング分布の精度に大きな影響を与える場合も多く、深刻な推定精度の悪化を招くこともあった。

これに対して本論文では遮蔽や障害物を含む厳しい実環境においても正確で頑健な状態推定を可能とする二つのサンプリング法の切り替え手法を提案する。この手法は推定した視覚ターゲットの状態についての確信度を用いて二つの相補的なサンプリング法を動的に切り替えることで、モデル化誤差の影響を小さく抑え、精度の良い推定の実現を図る。提案手法の有効性は実環境における視覚追跡実験によっても確認された。

また、実時間状態推定システムを利用した応用を考えると、一般により高度な応用となれば高次元の状態空間を扱う必要がある場合が多く、PF では推定精度を維持するために必要なサンプル数は次元数の増加に対して指数的に増加することが知られている。この様に状態空間の次元に対して非常に少数のサンプルで状態推定を行う必要がある

場合には、先述の通りモデル化誤差の影響を受けたサンプリング分布の精度低下が最終的な推定精度の低下に直結する。本論文では、画像列からの剛体の姿勢推定問題を階層的にモデル化し、各階層に仮定したモデルを用いてサンプルを生成するサンプリング分布を複数生成し、複数のサンプリング分布を適応的に混合・選択することで、各階層でのモデル化誤差が非定常に大きくなることの考え得る実環境においても頑健な実時間推定の実現を目指す。ここでは提案手法を実際の車内におけるドライバの視線方向推定問題に適用することで、その有効性を確認した。

(論文審査結果の要旨)

時系列ベイズ推定法のサンプル近似解法であるパーティクルフィルタは、直接観測することの出来ない隠れ状態の逐次推定問題、とりわけ隠れ状態の分布が非ガウスとなる課題に多く適用されてきた。しかし、一般に、環境及び対象のモデルとして近似モデルが用いられることが多く、近似モデルに存在するモデル化誤差がサンプルの生成を行うためのサンプリング分布にしばしば悪影響を及ぼす。この場合、サンプリング分布の精度低下が推定精度の著しい低下を引き起こすことがあり、特に、実環境における実時間状態推定問題のように準備できるサンプル数が厳しく制限される場合には大きな問題となる。本論文ではパーティクルフィルタを実環境における実時間状態推定問題に適用し、その上で生じる環境と対象のモデル化誤差に起因した推定精度の低下を小さく抑えるための手法を提案した。本論文の成果は以下のように要約される。

1. サンプリング法の純粋な性質を知るために、可能な限り問題を単純化した上で、異なるモデルを重視した複数のサンプリング分布を、推定に対する確信度という単純な規準を用いて動的に切り替えることで、各サンプリング分布に存在するモデル化誤差が推定に与える影響を小さく抑える手法を提案した。シミュレーション画像を用いた実験及び実画像を用いた実験を行い、提案手法の有効性を統計的に実証した。
2. より高次元の状態空間を持つ応用課題に対して、階層的にモデル化できる対象の状態推定を例にとり、各層を通して得られる複数の予測モデルを利用してサンプリング分布を複数生成し、事後分布への寄与の大きさから各予測モデルを評価して適応的に選択・混合することで各予測モデルに存在するモデル化誤差が推定に与える影響を小さく抑える手法を提案した。シミュレーション実験及び実環境で撮影された画像列を利用した実験を行い、提案手法の有効性を検証した。

これら一連の成果は、無くすことの困難なモデル化誤差の影響を大きく受ける実時間状態推定課題に対して、複数のモデルを準備し、その有効性を適用的に判断しながら使い分ける手法が、モデル化誤差の影響を小さく抑えるために有効なアプローチであることを示したものである。この知見は、過去に提案されてきた様々な手法を実問題に適用する際にも有用であると考えられ、大きな意義を持つ。本論文の成果は、工学、特に画像処理を含む実時間処理の分野において、学術的のみならず、応用上の寄与が大きいものと判断され、博士（工学）の学位論文として価値のあるものと認める。