

Streszczenie

Praca doktorska skupia się na wykorzystaniu Procesów Gaussowskich (GP) do modelowania i analizy złożonych zjawisk funkcjonalnych oraz detekcji usterek w systemach technicznych. W pracy podejmuje próbę rozszerzenia zakresu zastosowań procesów gaussowskich w naukach technicznych, zwłaszcza w kontekście diagnostyki systemów, które charakteryzują się nieliniowymi zależnościami oraz nagłymi zmianami stanu. Główne wyzwanie, z jakim się mierzę, dotyczy efektywnego modelowania tych systemów przy jednoczesnym uwzględnieniu niepewności predykcji oraz wykorzystania modeli generatywnych w przypadku niewystarczających danych.

Celem tej pracy doktorskiej było udowodnienie dwóch tez: 1. *Procesy Gaussowskie mogą wypełnić lukę w analizie zjawisk funkcjonalnych i diagnostyce* poprzez modelowanie złożonych nieliniowych zależności i dostarczanie kwantyfikacji niepewności, co jest kluczowe dla dokładnych prognoz i interpretowanych wyników; oraz 2. *generatywne modele Procesów Gaussowskich mogą być użyteczne w diagnostyce*, gdy brakuje danych, ponieważ pozwalają na tworzenie syntetycznych zbiorów danych odzwierciedlających właściwości funkcjonalne systemu, co zwiększa skuteczność algorytmów diagnostycznych.

Aby udowodnić te tezy w pracy tej koncentruję się na kilku kluczowych problemach badawczych. Przede wszystkim badałem zastosowanie GP do wykrywania anomalii, szczególnie w procesach przemysłowych, gdzie niestabilności i usterki mogą mieć poważne konsekwencje operacyjne. Modele GP, dzięki swojej probabilistycznej naturze, oferują nie tylko możliwość predykcji przyszłego zachowania systemu, ale również umożliwiają szacowanie niepewności tych przewidywań. W kontekście detekcji usterek, GP pozwalają na lepsze wykrywanie stanów przejściowych oraz niespodziewanych anomalii, które mogą być trudne do zidentyfikowania za pomocą tradycyjnych metod diagnostycznych.

Modele GP mogą być stosowane do tworzenia syntetycznych danych na potrzeby dalszych analiz. Jest to efektywne szczególnie w przypadkach, gdy rzeczywiste dane są ograniczone lub trudno dostępne. Takie podejście ma ogromne znaczenie w sytuacjach, gdzie zebranie wystarczającej ilości danych w rzeczywistych warunkach jest kosztowne lub czasochłonne. Dzięki możliwości generowania wiarygodnych danych, GP mogą wspomagać inne algorytmy diagnostyczne, poprawiając ich skuteczność i zwiększając dokładność detekcji usterek.

Moje badania obejmowały również rozwój metod poprawiających efektywność obliczeniową modeli GP. Tradycyjnie procesy gaussowskie wymagają skomplikowanych obliczeń, zwłaszcza przy pracy z dużymi zbiorami danych. W celu zminimalizowania tych trudności, zastosowałem metody takie jak aproksymacje Czebyszewa oraz szybką transformata Fouriera (FFT). To pozwoliło na znaczną redukcję obciążeń obliczeniowych, bez utraty jakości wyników, a co więcej na zachowaniu funkcjonalnych własności modelowanych danych.

W ramach mojej pracy doktorskiej modele GP zostały zastosowane w różnych kontekstach technicznych. Zastosowałem je do diagnostyki stanu zdrowia baterii litowo-jonowych, gdzie precyzyjne prognozowanie zużycia i ocena pozostałej żywotności mają kluczowe znaczenie dla zarządzania zasobami energetycznymi. Modele te okazały się szczególnie skuteczne w przewidywaniu stanu zdrowia baterii w różnych warunkach operacyjnych, oferując lepsze zrozumienie procesu degradacji. Ponadto, za pomocą GP modelowałem przestrzenne zmiany poziomu zanieczyszczeń powietrza, co pozwoliło na bardziej precyzyjne przewidywania, nawet w regionach o ograniczonej liczbie stacji pomiarowych. Kolejnym obszarem zastosowania była detekcja anomalii w sygnałach procesów przemysłowych, gdzie GP pozwoliły na identyfikację nieprawidłowości w stanach przejściowych, które wcześniej były trudne do wykrycia za pomocą tradycyjnych metod. Ponadto analizowałem możliwości klasyfikacji usterek urządzeń przy użyciu modeli mikstur Gaussowskich opartych na GP.

Podsumowując, moja praca doktorska wprowadza nowatorskie podejścia do wykorzystania procesów gaussowskich w diagnostyce systemów technicznych, zarówno w kontekście predykcji, jak i wykrywania usterek. Moje badania dostarczają praktyczne rozwiązania dla problemów obliczeniowych związanych z GP oraz pokazują, jak można je efektywnie zastosować w różnych dziedzinach, takich jak inżynieria elektryczna, modelowanie przestrzenne i diagnostyka procesów przemysłowych.

28.10.2024

Adrian Dulek

Abstract

My doctoral dissertation focuses on the application of Gaussian Processes (GP) for modeling and analyzing complex functional phenomena, as well as fault detection in technical systems. In my research, I aimed to extend the use of Gaussian Processes in technical sciences, particularly in the context of system diagnostics characterized by nonlinear dependencies and sudden changes in state. The main challenge I address involves effectively modeling these systems while accounting for prediction uncertainty and use of generative models in case of lack of data.

The aim of this dissertation was to prove two theses: 1. *Gaussian Process models can fill a gap in functional phenomena analysis and diagnostics* by modeling complex nonlinear dependencies and providing uncertainty quantification, which is crucial for accurate predictions and interpretable results; and 2. *generative Gaussian Process models can be useful in diagnostics when data is scarce*, as they allow for the creation of synthetic datasets that reflect the functional properties of the system, enhancing the effectiveness of diagnostic algorithms.

To prove these theses my work focuses on several key research problems. First and foremost, I investigated the use of GP for anomaly detection, especially in industrial processes where instability and malfunctions can have serious operational consequences. Due to their probabilistic nature, GP models not only allow for the prediction of future system behavior but also enable the estimation of the uncertainty of these predictions. In the context of fault detection, GP models are particularly effective in identifying transient states and unexpected anomalies, which are often difficult to detect using traditional diagnostic methods.

GP models can be employed to generate synthetic data for further analysis, especially in situations where real-world data is limited or difficult to obtain. This approach is crucial when collecting sufficient data in real conditions is costly or time-consuming. By generating reliable data, GP models can support other diagnostic algorithms, improving their effectiveness and enhancing fault detection accuracy.

My research also involved developing methods to improve the computational efficiency of GP models. Traditionally, Gaussian Processes require complex computations, particularly when working with large datasets. To minimize these challenges, I applied Chebyshev approximation and Fast Fourier Transform (FFT). This led to significantly reduced computational burdens without sacrificing the quality of the results, as well as maintain the functional behavior of the modelled data. These solutions made GP models more practical for real-time applications, especially in industrial environments.

In my doctoral dissertation, GP models were applied in various technical contexts. I used them for the diagnostics of lithium-ion battery health, where accurate predictions of battery wear and the remaining useful life are crucial for resource management. These models proved particularly effective in predicting battery health under different operating conditions, providing better insights into the degradation process.

Additionally, I used GP models for spatial modeling of air pollution, allowing for more precise predictions even in regions with limited monitoring stations. Another area of application was the detection of anomalies in industrial process signals, where GP enabled the identification of anomalies in transient states that were previously difficult to detect with traditional methods. Additionally, I analyzed the possibilities of classifying devices faults using GP-based Gaussian mixture models.

In conclusion, my doctoral research introduces innovative approaches to using Gaussian Processes in technical system diagnostics, both in the context of prediction and fault detection. My research provides practical solutions to computational challenges associated with GP and demonstrates how they can be effectively applied in various fields, such as electrical engineering, spatial modeling, and industrial process diagnostics.

28.10.2024

Adrian Dally