

Diss. ETH No. 21648

Failure and Degradation Prediction by Artificial Neural Networks: Applications to Railway Systems

A dissertation submitted to

ETH Zurich

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

Olga Fink

Dipl.-Ing. Oec Hamburg University of Technology

born February 10th, 1983
citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. U. A. Weidmann, examiner
Prof. Dr. J. Andrews, co-examiner

2014

Abstract

Passenger and freight railway demand has grown significantly during the last decades. Railway operators have increased service frequencies and extended network connectivity to serve this demand, but these adjustments have increased system complexity and decreased buffering capacities. As a result, railway systems are now operating closer to their stability boundaries. Consequently, single failures or delays are more likely to propagate through the railway network and reduce operational reliability.

One way railways are addressing these problems is by installing advanced monitoring and diagnostic devices in many components. These devices assist operating and maintenance personnel in handling faults and failures and thereby help reduce down time. While these monitoring systems advance conventional maintenance procedures, their main potential is providing input data for proactive predictive maintenance programs. In a predictive maintenance program, activities are performed based on the predicted failure and degradation behaviour of individual systems, made using the actual condition of these systems. This is in contrast to standard preventive maintenance programs based on the condition of an average system. Predictive maintenance programs increase operational reliability, help reduce delays, improve the efficiency of resource use and reduce overall maintenance costs, compared to standard preventive maintenance programs.

However, these advanced monitoring and diagnostic systems generate a very large amount of high dimensional data that is difficult to analyse using standard approaches. In several similar cases, self-adaptive data-based algorithms, such as artificial neural networks, have been shown to be a promising method for predicting failures or degradation behaviour when applied alone or in combination with other prediction methods.

This research evaluated the potential of artificial neural networks for predicting failures and degradation behaviour in railway systems. The research considered an extensive range of neural network types, characteristics and combinations, as well as different railway systems and problem types. The research developed a framework for designing and applying neural networks for predicting failure and degradation behaviour of railway systems. Several approaches were derived based on this framework, and then validated in eight case studies covering different railway systems, problem and data types, different algorithms and their characteristics. The main practical goal was to identify approaches for predicting the occurrence of operational disruption events and critical degradation conditions based on diagnostic data. The datasets used in the case studies were derived from two real railway systems: a rolling stock fleet and a turnout infrastructure system.

As part of this research, seven types of neural networks were tested to diagnose and predict failure and degradation behaviour of railway systems: echo state networks, restricted and conditional restricted Boltzman machines, growing neural gas, extreme learning machines (a combination of artificial neural networks and support vector machines), deep belief networks, and multilayer feedforward networks based on multi-valued neurons (a special type of complex valued neural network). The neural networks were applied in three ways: as stand-alone algorithms, in combination with other neural networks or with other machine learning and soft computing techniques, such as principal component analysis and fuzzy sets. The approaches developed as part of this research were also compared to an alternative prediction approach, multilayer perceptrons trained with different types of learning algorithms.

The neural network algorithms, their combinations, pre-processing and feature extraction techniques developed in this research were able to successfully predict failure and degradation behaviour in the case study railway systems. They outperformed multilayer perceptrons not only in terms of prediction precision, but also in terms of computing time, ease of use, and required user knowledge for parameter selection. Several enhancements and supplementary algorithms developed as part of this research helped improve primary neural network algorithm performance. The case study evaluation showed that some of the algorithms were particularly powerful in very specific fields of application, while others were applicable to a wider range of problems and were more universal. All the neural network algorithms tested in the case studies proved to have specific strengths either in feature extraction, pattern recognition or time series prediction tasks. Finally, the discrete event data derived from the railway rolling stock fleet were found to be sufficient for predicting the occurrence of disruption events.

Two approaches: one neural network based and one non-parametric statistical approach were tested for their ability to identify novel and anomalous patterns in datasets. One of the underlying assumptions when applying data-based methods for pattern recognition is that the data sample used to train and test the algorithm is representative of the entire dataset and that it covers all combinations of parameters and conditions, and resulting system states. However, in practice, new anomalous patterns may develop due to changes in operating and environmental conditions or the occurrence of unexpected and previously unanticipated events. Consequently, for practical applications, techniques must be developed to detect novelties in patterns and provide confidence to the user on the validity of the diagnosis and predictions. This research proposed an approach for novelty detection based on the growing neural gas algorithm and compared it to a statistical non-parametric approach, the multivariate kernel density estimation.

An important part of this research was developing a methodology for quantifying the reliability of an arbitrary classifier at the level of individual prediction rather than relying solely on average level predictions (the approach typically used in other studies). The proposed methodology is a meta approach based on Kolmogorov's concept of randomness. The approach considers variables including the similarity to other patterns in the training dataset, novelty of the patterns, and algorithm performance in the specific region of the input space during the training process. The quantification of accuracy at the level of individual predictions provides confidence to the decision maker in the performed prediction. This helps railway operators avoid making inefficient resource allocations and reduces operational disturbances based on erroneous fault classifications.

To summarize, this research evaluated the ability of several artificial neural networks to diagnose and predict failure and degradation behaviour of railway systems. The neural network algorithms and their combinations developed in this research were tested in real case studies using diagnostic data from a railway rolling stock fleet and an infrastructure system. The algorithms were able to successfully predict failure and degradation behaviour in the case study railway systems and outperformed the alternative approach (multilayer perceptrons) with respect to several performance criteria.

In addition, this research proposed and validated an approach to identify novel and anomalous patterns in railway system datasets. Finally, this research developed an approach to quantify the reliability of classifiers at the level of individual predictions based on Kolmogorov's concept of randomness.

The main practical contribution of this research is that it demonstrates the potential benefits of applying recorded diagnostic data for predicting failures and degradation behaviour in railway systems and proposes specific neural network algorithms that can be used to accomplish these tasks. Using these algorithms can help railway operators reduce disruptions and thereby improve operational reliability, system availability and economic results.

Zusammenfassung

Die Nachfrage im Personen- und Güterverkehr hat in den letzten Jahrzehnten stark zugenommen. Dies führte zu höheren Taktfrequenzen und einem höheren Vernetzungsgrad des Bahnnetzes. Dies wiederum resultierte in einer Zunahme der Systemkomplexität sowie in einem Abbau der Pufferkapazitäten. Infolgedessen werden Bahnsysteme näher an ihrer Stabilitätsgrenze betrieben. Einzelne Ausfälle und Störungen können sich dadurch im Eisenbahnnetz viel einfacher und schneller ausbreiten und die betriebliche Zuverlässigkeit und Stabilität stark beeinflussen.

Um besser mit der steigenden technischen Komplexität der Systeme umgehen zu können, werden Komponenten im zunehmenden Masse mit modernen Zustandsüberwachungs- und Diagnosesystemen ausgerüstet. Einer der Hauptverwendungszwecke der Diagnosesysteme ist die Unterstützung des Bedien- und Wartungspersonals im Umgang mit Störungen und Ausfällen, womit ein Beitrag zur Reduktion der Stillstandszeiten geleistet wird. Obwohl Zustandsüberwachungssysteme einen deutlichen Fortschritt im Vergleich zu herkömmlichen Instandhaltungspraktiken gebracht haben, beinhalten diese jedoch immer noch keine proaktive Planung der vorausschauender Instandhaltung. Allerdings stellen diese Zustandsüberwachungssysteme auch Daten über den spezifischen Systemzustand zur Verfügung. Diese Daten könnten eingesetzt werden, um Ausfälle und Fehlfunktionen, die den operativen Betrieb beeinflussen können, zu verhindern und damit Verspätungen zu reduzieren und betriebliche Zuverlässigkeit zu erhöhen.

Zustandsüberwachungssysteme generieren grosse Mengen hochdimensionaler Daten, die mit herkömmlichen Ansätzen und Methoden nur eingeschränkt analysierbar sind. In vielen vergleichbaren Anwendungen haben selbstadaptive datenbasierte Algorithmen, zu denen auch künstliche neuronale Netze gehören, zu vielversprechenden Ergebnissen geführt.

Die vorliegende Dissertation bietet eine umfassende Untersuchung des Anwendungspotenzials der neuronalen Netze zur Prognose von Ausfällen und Verschleissverhalten von Bahnsystemen. Sie umfasst ein breites Spektrum von verschiedenen Arten und Eigenschaften neuronaler Netze und deren Kombinationen, analysierter Systeme und Problemtypen. Im Rahmen dieser Forschung wurde ein Ansatz für ein strukturiertes Vorgehen für die Entwicklung und Anwendung von neuronalen Netzen zur Prognose von Ausfällen und Verschleissverhalten von Bahnsystemen ausgearbeitet und anhand von acht realen Anwendungsfallstudien von Schienenfahrzeug- und Infrastruktursystemen validiert. Die Hauptmotivation aus der Praxissicht war die Entwicklung von Ansätzen zur Prognose von Ausfallereignissen und kritischen Verschleisszuständen auf Basis von Diagnosedaten von zwei Eisenbahnsystemen, einem Rollmaterial- und einem Infrastruktursystem.

Im dieser Dissertation wurden sieben verschiedene Typen von neuronalen Netzen zur Diagnose und Prognose von Ausfällen und Verschleissverhalten von Bahnsystemen eingesetzt: Echo State Networks, Restricted und Conditional Restricted Boltzman Machines, Growing Neural Gas, Extreme Learning Machines (eine Kombination von neuronalen Netzen und Support-Vector-Machines), Deep Belief Networks und Multilayer Feedforward Networks basierend auf Multi-Valued Neurons (ein spezieller Typ komplexwertiger neuronaler Netze). Die neuronalen Netze wurden auf drei verschiedene Arten angewendet: als eigenständige Algorithmen, in Kombination mit anderen neuronalen Netzen oder mit anderen Methoden des maschinellen Lernens und des Soft Computing, wie z.B. Hauptkomponentenanalyse oder Fuzzy Sets. Die entwickelten Algorithmen wurden mit anderen Prognose-Algorithmen verglichen, den Multilayer Perceptrons, die mit verschiedenen Lernalgorithmen trainiert wurden.

Die im Rahmen dieser Dissertation entwickelten neuronalen Netze und deren Kombinationen konnten erfolgreich für die Prognose des Ausfall- und Verschleissverhaltens eingesetzt werden. Sie waren leistungsfähiger als die Multilayer Perceptrons, sowohl in Bezug auf die Prognosegenauigkeit, Rechenzeit und Benutzerfreundlichkeit als auch in Bezug auf die erforderlichen Anwenderkenntnisse bei der Parameterwahl. Die entwickelten Erweiterungen und die unterstützend eingesetzten Algorithmen haben die Leistungsfähigkeit der primär eingesetzten Algorithmen der neuronalen Netze deutlich verbessert. Die Evaluation der neuronalen Netze anhand der Fallstudien hat gezeigt, dass einige der Algorithmen besonders leistungsfähig in sehr spezifischen Anwendungsbereichen sind, während andere Algorithmen für ein breiteres Spektrum von Problemen einsetzbar und damit vergleichsweise universell sind. Alle in den Fallstudien eingesetzten neuronalen Netze haben spezifische Stärken entweder beim Extrahieren von Merkmalsvektoren, bei der Mustererkennung oder bei der Zeitreihenvorhersage gezeigt. Darüber hinaus haben sich die diskreten Diagnose-Ereignis-Daten der Rollmaterial-Flotte als hinreichend für die Prognose des Auftretens von Störereignissen erwiesen.

In dieser Dissertation wurden zwei verschiedene Ansätze: ein neuronales Netz und eine nicht-parametrische statistische Methode auf ihre Eignung zur Erkennung von neuartigen und abweichenden Mustern getestet. Eine der grundlegenden Annahmen bei der Verwendung von datenbasierten Methoden zur Mustererkennung in der Diagnostik oder Prognostik ist die Repräsentativität der gewählten Datenstichprobe für den gesamten Datensatz (einschliesslich aller möglichen Kombinationen von Parametern und Systemzuständen). Jedoch können sich Betriebs- und Umgebungsbedingungen in der Praxis ändern, unvorhergesehene Ereignisse auftreten und sich daraus neuartige und abweichende Muster entwickeln. Deshalb müssen für praktische Anwendungen Techniken entwickelt werden, um diese neuartige Muster zu erkennen und dem Anwender Vertrauen in die Gültigkeit der durchgeführten Diagnosen und Prognosen zu vermitteln. In dieser Arbeit wurde ein Ansatz basierend auf dem Growing Neural Gas Algorithmus zur Erkennung von neuartigen Datenmustern entwickelt und mit einem nicht-parametrischen statistischen Ansatz, dem multivariaten Kerndichteschätzer, verglichen.

Einen wichtigen Teil dieser Forschung stellt die Entwicklung eines Ansatzes zur Quantifizierung der Zuverlässigkeit eines beliebigen Klassifikationsalgorithmus auf der Ebene der einzelnen Prognose und nicht nur auf Basis der durchschnittlichen Leistungsfähigkeit (typischerweise angewendet in anderen Studien) dar. Der entwickelte Meta-Ansatz basiert auf Kolmogorov's Konzept der Zufälligkeit. Der Ansatz beinhaltet als Inputparameter die Quantifizierung der Ähnlichkeit des Datensatzes zu anderen Trainingsmustern, Neuartigkeit der Muster und die Performance des Algorithmus in der spezifischen Region der Eingabedaten während des Trainingsprozesses. Die Quantifizierung der Vorhersagegenauigkeit auf der Ebene der einzelnen Prognose wird insbesondere benötigt, um dem Entscheidungsträger Vertrauen in die durchgeführte Prognose geben zu können. Dadurch können Entscheidungen bezüglich der Instandhaltungstätigkeiten, die auf fehlerhaften Klassifikationen basieren und zu einer ineffizienten Ressourcenallokation und Betriebsstörungen führen könnten, vermieden werden.

Zusammenfassend wurden in dieser Dissertation verschiedene Arten von künstlichen neuronalen Netzen und deren Kombinationen bezüglich ihrer Eignung zur Diagnose und Prognose von Ausfällen und des Verschleissverhaltens von Bahnsystemen evaluiert. Die neuronalen Netze und deren Kombinationen wurden auf reale praktische Fallstudien angewendet, basierend auf Diagnosedaten einer Schienenfahrzeugflotte und eines Eisenbahninfrastruktursystems. Die entwickelten Algorithmen konnten erfolgreich für die Prognose des Ausfall- und Verschleissverhaltens eingesetzt werden und zeigten eine deutlich bessere Leistungsfähigkeit im Vergleich zu anderen Methoden (Multilayer Perceptron) in Bezug auf mehrere Kriterien.

Darüber hinaus wurde in dieser Arbeit ein Ansatz zur Erkennung von neuartigen Mustern entwickelt und validiert. Schliesslich wurde auch ein Ansatz zur Quantifizierung der Zuverlässigkeit

von Klassifikationsalgorithmen auf der Ebene der einzelnen Prognosen entwickelt, basierend auf Kolmogorov's Konzept der Zufälligkeit.

Der wichtigste Beitrag dieser Arbeit aus der Anwendungssicht ist die Demonstration des Potentials der Anwendung der Diagnosedaten von Bahnsystemen für die Prognose des Auftretens von Ausfällen und der Entwicklung des Verschleissverhaltens sowie die Empfehlung des Einsatzes von geeigneten Algorithmen zur Bewältigung dieser Aufgaben. Der Einsatz dieser Algorithmen kann den Betreibern ermöglichen, Störungen zu reduzieren und damit die betriebliche Zuverlässigkeit und die Verfügbarkeit von Bahnsystemen sowie die Wirtschaftlichkeit zu verbessern.