

Ausgewählte numerische Analyse- und Entwurfsstrategien mit polymorph unscharfen Datenmodellierungen

Der Fakultät Bauingenieurwesen
der Technischen Universität Dresden
eingereichte

Dissertationsschrift

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegt

von

Dipl.-Ing. Ferenc Leichsenring
geboren am 30. März 1989 in Dresden

eingereicht am

11. August 2020

Gutachter

Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kaliske
Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Graf
Prof. Dr.-Ing. habil. Kai Willner

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit werden numerische Analyse- sowie Entwurfsmethoden beschrieben und diskutiert, die mit polymorphen Unschärfemodellen für Ingenieurfragestellungen zur Anwendung kommen.

Wird der Ingenieurprozesse als *input-output*-System betrachtet, führt die realitätsnahe Quantifizierung der Datenunschärfe sowohl der Eingangs- als auch der Ausgangsdaten auf ein verbessertes Systemverständnis und Bewertung der Systemgrenzen. Die polymorphe Unschärfemodellierung erlaubt die Berücksichtigung aleatorischer sowie epistemischer Unschärfe und ist in dieser Arbeit mit fuzzy-wahrscheinlichkeitsbasierten Zufallsvariablen formuliert. Die Beschreibung und Implementation basiert – mit Ausnahme des propabilistischen Anteils – auf Intervall-Variablen, welche eine anwendungsorientierte Darstellung der Datenunschärfe ermöglichen und deren Bewertung mit Fuzzy-Sets erweitert werden. Entsprechend sind Methoden der numerischen Unschärfequantifizierung und Datenanalysewerkzeuge vorgestellt und entwickelt, die den Fragestellungen verschiedener Ingenieuraufgaben hinsichtlich der Datenmodellierung der Eingangsdaten und Auswertung unscharfer Zielgrößen gerecht werden. Dazu gehören u.a. Methoden der Sensitivitätsanalyse, Clusteridentifikation, uni- und multivariate Intervallschätzung/Fuzzy-Analyse sowie die erweiterte Fuzzy-Analyse für die Bewertung unscharfer ortsabhängiger Strukturgrößen.

Für die Berücksichtigung der Unschärfe in mehrskaligen Strukturanalysen werden die Analysemethoden für die numerische Homogenisierung von Betonstrukturen eingesetzt. Auf der Mesostrukturebene werden Zuschlagskörner – eingebettet in der Zementphase – als wesentliche Bestandteile des heterogenen Werkstoffs angenommen. Hierbei werden die mesoskopischen unscharfen Parameter mit der multivariaten Intervallschätzung berechnet. Die gezeigten Unschärfequantifizierungsmethoden basieren mehrheitlich auf der gezielten Auswertung der deterministischen Grundlösung. Adäquate Ersatzmodelle aus dem Bereich des *machine learning* werden sowohl für die Dimensionsreduktion als auch punktweise Approximation funktionaler Zusammenhänge vorgestellt und für die numerische Mehrskalensimulation angewendet. Um den Skalenübergang der unscharfen mesoskopischen Strukturgrößen zu ermöglichen, werden rekurrente neuronale Netze mit *long short-term memory*-Zellen als Ersatzmodell des unscharfen Materialverhaltens genutzt und zu konstitutiven Beziehungen auf Strukturebene erweitert sowie implementiert.

Die Formoptimierung von Tragstrukturen wird als Entwurfsaufgabe vorgestellt. Der numerische Entwurf mit unscharfen Entwurfs- und a priori-Parametern wird als Optimierungsproblem formuliert. Das erfordert die Definition von Ersatzproblemen, da die Vergleichbarkeit unscharfer Größen nicht direkt möglich ist. Der deterministische Vergleich bzw. die Bewertung gelingt mit unschärfereduzierenden Maßen, die in

der Arbeit vorgestellt werden. Diese werden u.a. in einer Erweiterung der Einkriterienoptimierungsaufgabe unter Berücksichtigung der Unschärfe von Entwurfs- und a priori-Parametern zu einer Mehrkriterienoptimierungsaufgabe angewendet, um sowohl die Unschärfeinformation als auch die Quantität der Optimierungszielgröße zu erhalten.

Die Methoden werden anhand von Beispielen veranschaulicht und verdeutlichen den Anwendungsrahmen der polymorphen Unschärfewertung sowie effizienter Algorithmen.

Summary

In this thesis numerical analysis and design methods are described and discussed, which can be applied in engineering problems utilizing polymorphic uncertainty models.

Based on the consideration of engineering processes as input-output systems, the realistic uncertainty quantification of the input and output data leads to an improved understanding of the principle system behaviour and the evaluation of system boundaries. The polymorphic uncertainty modelling allows the consideration of aleatoric as well as epistemic uncertainty and is described in this thesis by fuzzy probability based random variables. The description and implementation – with the exception of the probabilistic part – is carried out by interval variables, which allow an application-oriented representation and evaluation of the uncertainty. A further possibility assessment yields to fuzzy sets. Methods for numerical uncertainty quantification and data analysis tools are presented and developed, which meet the requirements of different engineering questions regarding data modelling of input data and evaluation of uncertain objective variables. This incorporates methods of sensitivity analysis, cluster identification, uni- and multivariate interval estimation or fuzzy analysis as well as an extended fuzzy analysis for the evaluation of spatially dependent uncertain structure variables.

For the consideration of uncertainty in multiscale structural analyses, the uncertainty analysis methods are utilized in the numerical homogenization of concrete structures. On the mesoscale, aggregates – embedded in the cement phase – are assumed to be the major contributing components of the heterogeneous material mixture. Mesoscopic uncertain parameters are quantified by the multivariate interval estimation. The presented uncertainty quantification methods are based on the discrete evaluation of the deterministic fundamental solution. Adequate surrogate models based on machine learning strategies are presented for the dimension reduction, point-wise approximation of functional dependencies and the utilization in multiscale structural analysis. The scale transition of uncertain mesoscopic structural quantities is carried out by recurrent neural networks with long short-term memory cells, which are applied as surrogate model for uncertain material behaviour and extended as well as implemented as constitutive relationship on structural level.

Shape optimization of structures is presented with respect to numerical design tasks. The numerical design with uncertain design and a priori quantities is defined as an optimization problem and requires the definition of substitute tasks, since the comparability of uncertainty parameters based on quantitative relation measures is not feasible. The deterministic comparison/evaluation is enabled by information reduction measures, which are presented in the thesis. These measures are e.g. utilized in the extension of single objective optimization to multi objective optimization tasks in order to preserve the uncertainty information as well as the physical quantity of the objective.

The presented methods are applied to examples and highlight the applicability of polymorphic uncertainty evaluation and necessity of efficient algorithms.