

Inelastic material modeling for steady-state rolling structures within Isogeometric Analysis

Inelastische Materialmodellierung für stationäre rollende Strukturen im Rahmen der isogeometrischen Analyse

Zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing)
an der Fakultät Bauingenieurwesen
der Technischen Universität Dresden
eingereichte

Dissertation

von M. Sc. Mario Alejandro Garcia Tzintzun
geboren am 08. August 1985 in Morelia

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kaliske
Technische Universität Dresden

Prof. Dr.-Ing. habil. U. Nackenhorst
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

Prof. Dr. Y. Wei
Tsinghua University

Einreichung: 5. Oktober 2023
Öffentliche Verteidigung: 27. März 2024

Summary

The continuous development and improvement of pneumatic tires requires the challenging task of understanding the rolling phenomenon of complex geometrical structures, made by sophisticated construction techniques and highly engineered rubber compounds. Numerical tools like Finite Element Analysis (FEA) provides valuable information and allows us to take a closer look at regions in the structure in a way which cannot be achieved by experimental testing. However, simulations are only as good as the model allows it, and the description of a tire model under realistic rolling conditions is a complex task.

The present work focuses on the model description from two points of view: the geometry and the material. The description of round shapes is not a trivial task in FEA, especially considering linear elements, which are typically used in industrial applications. A finer discretization will provide more accurate results at the expense of computational efficiency and, yet, have intrinsic limitations, like discontinuities in derived numerical fields. Therefore, the use of Isogeometric Analysis (IGA) for describing accurate round bodies is proposed. It is shown that higher order B-spline-based functions, besides being able to describe a circle, allows the higher order continuity across element boundaries, which enables the capability of tracking velocity and acceleration fields in a smooth and continuous manner.

Furthermore, the second point for improvement deals with the inelastic model of the material. Energy dissipation is taken into account by a viscoelastic model and a discussion on the capabilities of linear and non-linear models is presented, within an Arbitrary Lagrange-Eulerian framework for the description of the rolling phenomenon. The choice of an unsplit method for keeping track of the internal variables leads to a consistent linearization of the constitutive model and coupling terms along circumferential rings are generated.

The approaches and their implementation are discussed in detail and evaluated by different numerical examples. Furthermore, the isogeometric model of a viscoelastic rolling tire is validated by laboratory and field tests, where different tire maneuvers are evaluated and the required boundary conditions for steady-state rolling simulations are discussed. Moreover, acceleration data obtained by a sensor located in the inner liner is used to evaluate the advantages of the continuous geometrical model.

Zusammenfassung

Die kontinuierliche Entwicklung und Verbesserung von Luftreifen erfordert die schwierige Aufgabe, das Abrollverhalten komplexer geometrischer Strukturen zu verstehen, die durch ausgeklügelte Konstruktionstechniken und hochentwickelte Gummimischungen entstehen. Numerische Werkzeuge wie die Finite-Elemente-Analyse (FEA) liefern wertvolle Informationen und ermöglichen es uns, Regionen in der Struktur auf eine Weise näher zu betrachten, die durch experimentelle Tests nicht erreicht werden kann. Simulationen sind jedoch nur so gut, wie es das Modell erlaubt, und die Beschreibung eines Reifenmodells unter realistischen Abrollbedingungen ist eine komplexe Aufgabe.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Modellbeschreibung unter zwei Gesichtspunkten: die Geometrie und das Material. Die Beschreibung runder Formen ist keine triviale Aufgabe in der FEA, insbesondere wenn lineare Elemente berücksichtigt werden, die typischerweise in industriellen Anwendungen verwendet werden. Eine feinere Diskretisierung liefert genauere Ergebnisse auf Kosten der Recheneffizienz, hat aber auch ihre Grenzen, beispielsweise in Form von Diskontinuitäten in den abgeleiteten numerischen Feldern. Daher wird die Verwendung der Isogeometrischen Analyse (IGA) zur Beschreibung von genauen runden Körpern vorgeschlagen. Es wird gezeigt, dass B-Spline-basierte Funktionen höherer Ordnung nicht nur in der Lage sind, einen Kreis zu beschreiben, sondern auch eine Kontinuität höherer Ordnung über die Elementgrenzen hinweg ermöglichen, wodurch Geschwindigkeits- und Beschleunigungsfelder in einer glatten und kontinuierlichen Weise verfolgt werden können.

Der zweite Arbeitsbereich betrifft das inelastische Modell des Materials. Die Energiedissipation wird durch ein viskoelastisches Modell berücksichtigt, und es wird eine Diskussion über die Möglichkeiten linearer und nichtlinearer Modelle innerhalb eines beliebigen LAGRANGE-EULERIAN-Rahmens für die Beschreibung des Rollphänomens geführt. Die Wahl einer ungeteilten Methode zur Verfolgung der internen Variablen führt zu einer konsistenten Linearisierung des konstitutiven Modells und es werden Kopplungsterme entlang von Umfangsringen generiert.

Die Ansätze und ihre Umsetzung werden im Detail diskutiert und anhand verschiedener numerischer Beispiele bewertet. Darüber hinaus wird das isogeometrische Modell eines viskoelastischen rollenden Reifens durch Labor- und Feldversuche validiert, in denen verschiedene Reifenmanöver bewertet und die erforderlichen Randbedingungen für stationäre Rollsimulationen diskutiert werden. Darüber hinaus werden die Vorteile des kontinuierlichen geometrischen Modells anhand von Beschleunigungsdaten bewertet, die von einem auf der Innenseite des Reifens befindlichen Sensor gewonnen wurden.