

A Coupled Implicit Material Point – Finite Element Method for Fracture Simulation by the Eigenerosion Approach

Eine gekoppelte implizite Materialpunkt – Finite Elemente Methode für die Simulation bruchmechanischer Phänomene nach dem Ansatz der Eigenerosion

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

Dissertation

von
M.Sc. Ahmad Chihadeh
geboren am 29. March 1990 in Benghazi

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kaliske
Technische Universität Dresden
Prof. Dr. Will Coombs
Durham University
Prof. Dr. Anna Pandolfi
Politecnico di Milano

Tag der Einreichung: 22. May 2023

Tag der Verteidigung: 05. July 2023

Summary

Fracture problems in solid mechanics are often a challenge for engineers. Such problems may undergo large deformations that require numerical methods, which are capable of modeling the structural response with satisfying accuracy and acceptable computational cost. The finite element method (FEM), which is the most widely used numerical method in engineering applications for solid mechanics, fails when the deformations of the mesh are extremely high and the elements are strongly distorted. For such cases, the Material Point Method (MPM) is an alternative numerical method. In the framework of simulation of fracture, the thesis at hand is focused on introducing the eigenerosion fracture approach into the implicit MPM and on coupling the MPM with the FEM.

In order to overcome the problem of large element distortion in the FEM, the MPM is adopted to simulate fracture problems. In the MPM the material points move over a computational mesh which is reset to the undeformed configuration at the end of each time step. Mesh resetting is the key point which differs the MPM from the FEM and allows to avoid mesh distortion problem.

In this work, the eigenerosion model is introduced within the implicit MPM. Crack development is basically approximated by the erosion of material points. The material points can be either intact or eroded and are categorized according to the energy release rate in comparison to the critical energy release rate. Different mechanism that describe a crack, i.e. crack initiation, orientation, branching, and coalescence, can be captured by the eigenerosion approach.

Besides the main advantage of the MPM, which is solving the problem of mesh distortion, it has some disadvantages. Compared to the FEM, the MPM is slower, less accurate, and has less numerical stability. Therefore, coupling of the MPM with the FEM is introduced in the thesis at hand. The developed coupling method includes coupling MPM with continuum finite elements in the same body, coupling MPM with truss finite elements in order to model reinforced structures, and contact between material points and finite elements. The introduced coupling approach is monolithic, which means that one global system is built for both MPM and FEM. Furthermore, it has no limitations and can be applied in any kind of simulations.

The successful coupling approach opens the door for an advanced step in optimizing the simulation by the automated conversion of finite elements to material points introduced in this work. Starting the simulation with only finite elements, and during the simulation when necessary, some of the finite elements are converted into material points based on a defined criterion, is a significant step in improving the simulation by limiting the domain discretized by the MPM as much as possible.

The introduced advancements are validated through a series of representative numerical examples. The results demonstrate that incorporating the eigenerosion scheme into the MPM, along with coupling it with the FEM, offers a promising approach for modeling fracture problems with extreme deformations, providing satisfactory accuracy and reasonable computational costs.

The developed approaches are programmed in an MPM-FEM software which has been constructed during the work of this thesis. The entire framework and all algorithms have been coded from scratch by FORTRAN programming language.

Zusammenfassung

Bruchprobleme in der Festkörpermechanik stellen für Ingenieure oft eine Herausforderung dar. Solche Probleme können große Verformungen erfahren, die numerische Methoden erfordern, die in der Lage sind, die strukturelle Reaktion mit zufriedenstellender Genauigkeit und akzeptablen Rechenkosten zu modellieren. Die Finite-Elemente-Methode (FEM), die am weitesten verbreitete numerische Methode in technischen Anwendungen der Festkörpermechanik, versagt, wenn die Verformungen des Netzes extrem hoch sind und die Elemente stark verzerrt sind. Für solche Fälle ist die Materialpunktmethode (MPM) eine alternative numerische Methode. Im Rahmen der Bruchsimulation konzentriert sich die vorliegende Arbeit auf die Einführung des Eigenerosionsbruchansatzes in die implizite MPM und auf die Kopplung der MPM mit der FEM.

Um das Problem der großen Elementverzerrungen in der FEM zu überwinden, wird das MPM für die Simulation von Bruchproblemen eingesetzt. Bei der MPM bewegen sich die Materialpunkte über ein Berechnungsnetz, das am Ende jedes Zeitschritts auf die unverformte Konfiguration zurückgesetzt wird. Das Zurücksetzen des Netzes ist der entscheidende Punkt, durch den sich das MPM von der FEM unterscheidet und das Problem der Netzverzerrung vermieden werden kann.

In dieser Arbeit wird das Eigenbruchmodell im Rahmen des impliziten MPM eingeführt. Die Rissentwicklung wird grundsätzlich durch die Erosion von Materialpunkten approximiert. Die Materialpunkte können entweder intakt oder erodiert sein und werden nach der Energiefreisetzungsrates im Vergleich zur kritischen Energiefreisetzungsrates kategorisiert. Verschiedene Mechanismen, die einen Riss beschreiben, d.h. Rissinitiierung, Orientierung, Verzweigung und Koaleszenz, können mit dem Eigenerosionsansatz erfasst werden.

Neben dem Hauptvorteil der MPM, der Lösung des Problems der Netzverzerrung, hat sie auch einige Nachteile. Im Vergleich zur FEM ist das MPM langsamer, weniger genau und hat eine geringere numerische Stabilität. Daher wird in der vorliegenden Arbeit eine Kopplung des MPM mit der FEM eingeführt. Die entwickelte Kopplungsmethode umfasst die Kopplung von MPM mit finiten Kontinuumelementen im selben Körper, die Kopplung von MPM mit finiten Fachwerkelementen zur Modellierung von verstärkten Strukturen und den Kontakt zwischen Materialpunkten und finiten Elementen. Der vorgestellte Kopplungsansatz ist monolithisch, was bedeutet, dass ein globales System sowohl für MPM als auch für FEM aufgebaut wird. Darüber hinaus hat er keine Einschränkungen und kann in jeder Art von Simulationen eingesetzt werden.

Der erfolgreiche Kopplungsansatz öffnet die Tür für einen weiteren Schritt zur Optimierung der Simulation durch die in dieser Arbeit vorgestellte automatische Umwandlung von finiten Elementen in Materialpunkte. Die Simulation nur mit finiten Elementen zu beginnen und während der Simulation, wenn nötig, einige der finiten Elemente in Materialpunkte auf der Grundlage eines definierten Kriteriums umzuwandeln, ist ein bedeutender Schritt zur Verbesserung der Simulation, indem die vom MPM diskretisierte Domäne so weit wie möglich eingeschränkt wird.

Die vorgestellten Fortschritte werden anhand einer Reihe von repräsentativen numerischen Beispielen validiert. Die Ergebnisse zeigen, dass die Einbindung des Eigenerosionsschemas in die MPM zusammen mit der Kopplung mit der FEM einen vielversprechenden Ansatz für die Modellierung von Bruchproblemen mit extremen Verformungen bietet, der eine zufriedenstellende Genauigkeit und angemessene Rechenkosten bietet.

Die entwickelten Ansätze sind in einer MPM-FEM-Software programmiert, die während der Arbeit an dieser Dissertation erstellt wurde. Der gesamte Rahmen und alle Algorithmen wurden von Grund auf mit der Programmiersprache FORTRAN kodiert.