

Recheneffiziente dynamische Simulation von Wasserrutschen mittels Flächengelenke

Alina Stepken, Francisco Geu Flores, Andrés Kecskeméthy

Lehrstuhl für Mechanik und Robotik, Universität Duisburg-Essen, Duisburg, Deutschland

Kurzfassung

Bei der Auslegung von neuen Wasserrutschen stehen zwei antagonistische Aspekte im Vordergrund: Der Spaß und die Sicherheit des Fahrgastes. Wasserrutschenhersteller sind immer auf der Suche nach innovativen Designs, die den Spaß der Fahrgäste maximieren, und würden gerne diese Suche bis an die Grenzen des Sicheren führen. Allerdings bietet der Stand der Technik keine Berechnungsmethode, welche diese Suche mit erschwinglichem Rechenaufwand unterstützen kann. Es besteht also ein Bedarf an schnellen und zuverlässigen Simulationstools, die z.B. mit Optimierungsroutinen gekoppelt werden können. Um diesen Bedarf zu decken, müssen drei technische Herausforderungen bewältigt werden: (1) Die Parametrisierung der Geometrie der Rutschenoberfläche mit einer überschaubaren Anzahl von Parametern, (2) die effiziente Modellierung des Rutschverhaltens eines Objekts auf der Rutsche, sowie (3) die effiziente Berechnung der auf der Rutschenoberfläche entstehenden Wasserrinne und derer Interaktion mit rutschenden Objekten.

In der bestehenden Literatur werden Wasserrutschengeometrien entweder als Aneinanderreihung von vordefinierten Rutschelemente (z.B. Gerade, Kreis, Spirale) mit rundem Querschnitt [8] oder mittels Oberflächenanpassung mit bivariaten B-Splines [2] modelliert. Während der erste Ansatz die Vielfalt an möglichen Designs beschränkt, führt der zweite Ansatz zu einem unüberschaubaren Parametersatz, der für praktische Applikationen nicht geeignet zu sein scheint [3]. Die Dynamik des rutschenden Objekts wird entweder als Punktmassenbewegung auf der Rutschenoberfläche in Minimalkoordinaten [2], [3] oder als Starrkörperbewegung unter dem Einfluss von regularisierten Kontaktkräften in kartesischen Koordinaten formuliert [8]. Die Wasserrinne und ihre Interaktion mit rutschenden Objekten wird entweder nicht berücksichtigt [2], [3] oder mithilfe von Finite-Volumen-Verfahren [1] berechnet, was zu sehr langen Rechenzeiten führt.

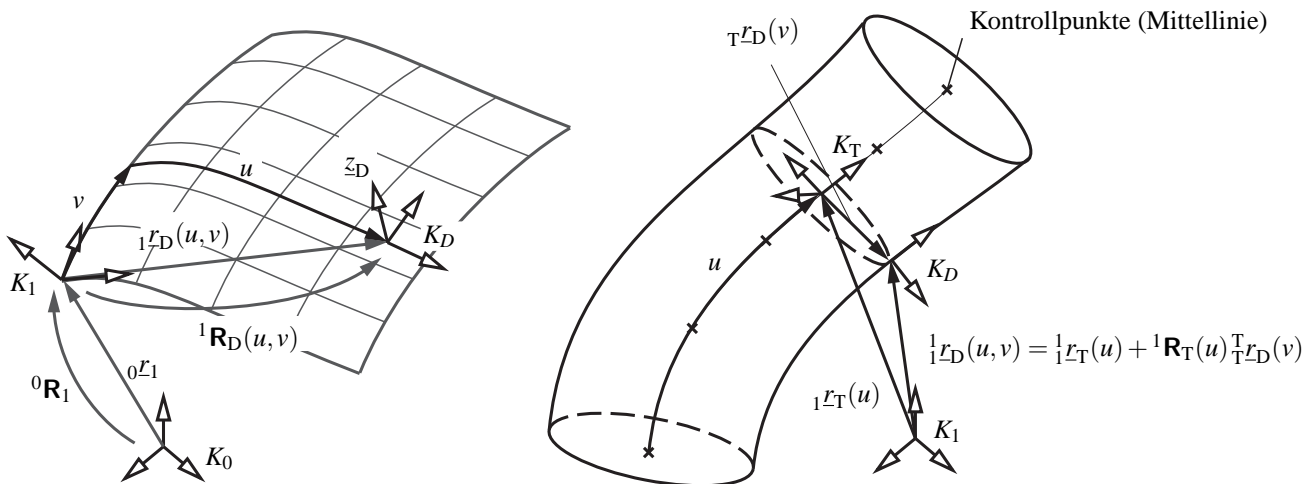


Bild 1 Flächengelenk (links) und Darstellung der B-Spline-Fläche durch einen univariaten B-Spline als Mittellinie und einen Querschnitt (rechts)

Im vorliegenden Beitrag wird eine Wasserrutsche mithilfe von Flächengelenken (Engl. “Surface Joints” [7]) unter Verwendung von Minimalkoordinaten modelliert. Ein Flächengelenk ist ein kinetostatisches Übertragungselement (s. Bild 1, links), das die Starrkörperbewegung einer parametrischen Fläche (Koordinatensystem K_1) und deren Parameter u und v auf die Bewegung eines Darboux-Koordinatensystems K_D abbildet. Die parametrische Fläche ${}^1r_D(u, v)$ wird über eine Mittellinie und einen Querschnitt beschrieben (s. Bild 1, rechts). Die Mittellinie wird mittels Kurvenanpassung mit univariaten B-Splines (Parameter u) durch Kontrollpunkte, durch die sie verlaufen soll, definiert. An jeder Stelle u der Mittellinie sind die Lage ${}^1r_T(u)$ und Orientierung ${}^1R_T(u)$ eines tangentialen Koordinatensystems K_T definiert. Der Querschnitt ${}^T r_D(v)$ wird an jeder Stelle u der Mittellinie über eine zweite univariate Funktion (Parameter v) bezüglich des Koordinatensystems K_T beschrieben. Diese besondere Parametrisierung weist einen überschaubaren Satz von Kontroll-

punkten auf, der sowohl eine komfortable graphische Schnittstelle zur Editierung der Rutschengeometrie als auch eine gutmütige Formulierung der Rutschenauslegung als nichtlineares Optimierungsproblem ermöglicht. Wie in [7] beschrieben, kann das Flächengelenk eingesetzt werden, um eine effiziente Formulierung der Bewegungsgleichungen auf der Fläche rutschender Objekten in Minimalform zu generieren.

Zur Ermittlung der Wasserrinne in der Rutsche werden diskretisierte Wasserstände über die Längskoordinate u der Rutsche mithilfe eines Bernoullifadens berechnet. Entsprechend der Stromfadentheorie [6] wird hierbei der Faden gesucht, der die Trajektorie des Wassers im stationären Zustand beschreibt. Hierfür wird eine Punktmasse unter Einfluss der Gravitation, Normal- und Reibkraft entlang der Rutsche rutschen gelassen. Unter der Annahme einer stationären Strömung wird durch die ermittelte Geschwindigkeit und eines gegebenen Volumenstroms die Querschnittsfläche mithilfe der Kontinuitätsgleichung berechnet. Die Interaktion der Wasserrinne auf das rutschende Objekt wird über verallgemeinerte Strömungswiderstandskräfte modelliert. Eine Validierung der Ergebnisse wird durch einen Vergleich mit zwei etablierten Simulationsprogrammen durchgeführt: Lammmps, einer Partikelsimulationsumgebung [5], und OpenFOAM [4], einer CFD Toolbox. Bild 2 zeigt links einen dreidimensionalen Vergleich der Schwerpunktvorgänge der Wasserrinne der drei Simulationen Lammmps, OpenFOAM und Flächengelenk in der Rutschengeometrie und rechts die numerischen Abweichungen der x , y und z -Koordinaten der Schwerpunkt untereinander. Es ist im Bild zu erkennen, dass die vorgeschlagene Flächengelenk-Simulation Abweichungen in der gleichen Größenordnung aufweisen wie die aufwendigen Simulationen untereinander haben. Während jedoch Lammmps und OpenFOAM Rechenzeiten in der Größenordnung von 30-40h benötigen, kann die Flächengelenk-Simulation in unter einer Minute berechnet werden. Dies bestätigt die erwartete Effizienzsteigerung bei vergleichbarer Berechnungsgüte für das vorliegende Problem.

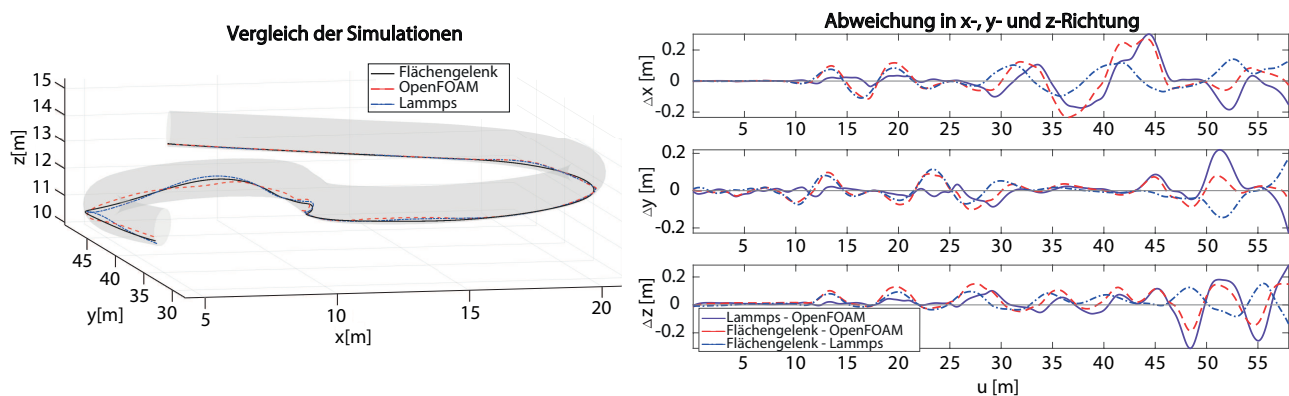


Bild 2 Vergleich der Wasserschwerpunkte der unterschiedlichen Simulationen (links) und numerische Abweichungen der Simulationen untereinander (rechts)

Das Vorhaben wird im Rahmen des Projektes „Entwicklung einer Echtzeit-gesteuerten Rutsche mit dynamischen Steuerelementen zur Geschwindigkeitsregelung und Entwicklung eines effizienten Rutschen-Simulationstools mit Wassermodell“ mit dem Förderkennzeichen ZF 4047814PO8 aus Mitteln des Zentralen Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie gefördert.

Literatur

- [1] Burzyński, K; Szydłowski, M: *Numerical Simulation of Rapidly Varied Water Flow in the 'Wild River' Type Water Slide*. Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics, Vol. 50, No. 1, Seiten 37-57, 2003.
- [2] Joo, S-H.; Chang, K-H.: *Design for Safety of Recreational Water Slides*. Mechanics of Structures and Machines, Vol. 29, Seiten 261-294, 2001.
- [3] Joo, S-H.; Chang, K-H.; Striz, A.: *Shape design optimization of CAD-based flume section*. 11th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference. 2006.
- [4] OpenFOAM: www.openfoam.org.
- [5] Plimpton, S.: *Fast Parallel Algorithms for Short-Range Molecular Dynamics*. J Comp Phys, 117, 1-19 (1995) <http://lammmps.sandia.gov>.
- [6] Spurk, J.; Aksel, N.: *Fluid Mechanics* (Third Edition). Springer Nature Switzerland AG, 2020.
- [7] Stepken, A.; Geu Flores, F.: *Minimal Coordinate Multibody Dynamics of Rolling Surfaces Using Surface Joints*. In: 15th IFToMM World Congress 2019, 30.06 - 04.07 Krakau, Polen. Advances in Mechanism and Maschine Science 2019. ISBN 978-3-030-20131-9. Seiten 3273-3282.
- [8] Szczepaniak, P.; Walentyński, R.: *Safety of Recreational Water Slides: Numerical Estimation of the Trajectory, Velocities and Accelerations of Motion of the User*. Lecture Notes in Computer Science, Vol. 4488, Seiten 219-226, 2007.

DuEPublico

Duisburg-Essen Publications online

UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN

Offen im Denken

ub | universitäts
bibliothek

In: Siebte IFToMM D-A-CH Konferenz 2021

Dieser Text wird über DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt. Die hier veröffentlichte Version der E-Publikation kann von einer eventuell ebenfalls veröffentlichten Verlagsversion abweichen.

DOI: 10.17185/duepublico/74046

URN: urn:nbn:de:hbz:464-20210217-073952-5

Alle Rechte vorbehalten.