

Christian Georg Kleinbach

**Simulation of Occupant Kinematics
using Active Human Body Models**

**SHAKER
VERLAG**



Band 60 (2019)

Simulation of Occupant Kinematics using Active Human Body Models

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Christian Georg Kleinbach
aus Ludwigsburg

Hauptberichter: Jun.-Prof. Dr.-Ing. Jörg Fehr
Mitberichter: Prof. Mats Svensson
Prof. Dr. Syn Schmitt

Tag der mündlichen Prüfung: 23. Oktober 2019

Institut für Technische und Numerische Mechanik
der Universität Stuttgart

2019

Schriften aus dem Institut für Technische und Numerische
Mechanik der Universität Stuttgart

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Peter Eberhard

Band 60/2019

Christian Georg Kleinbach

**Simulation of Occupant Kinematics
using Active Human Body Models**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Düren 2019

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2019

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7049-1

ISSN 1861-1651

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

"It never gets easier, you just go faster."

– Greg LeMond

"It never gets easier, you just write faster."

– the Author

Contents

Zusammenfassung	VII
Abstract	IX
1 Introduction	1
2 Basic Aspects of Vehicle Safety and Injury Biomechanics	5
2.1 Basics of Vehicle Safety	5
2.1.1 Regulations	7
2.1.2 Role of Testing and Simulation	9
2.1.3 Trends	12
2.2 Basics of Injury Biomechanics	13
2.2.1 Experimental Methods	14
2.2.2 Injuries	16
2.2.3 Limitations	19
3 Modeling Aspects	23
3.1 Surrogate Modeling	23
3.1.1 Standardized Anthropometric Test Devices	24
3.1.2 Human Body Models	26
3.1.3 Positioning of Surrogate Models	29
3.2 Muscle Modelling and Recruitment	31
3.2.1 The Extended Hill-type Muscle Model	33
3.2.2 Muscle Recruitment	38

4	Implementation of Active Muscles in a Human Body Model	47
4.1	Introduction to the ViVA OpenHBM	48
4.2	Modelling Torso Muscles	51
4.3	Modelling Cervical Muscles	53
4.4	Controlling Cervical Muscle Activation	61
5	Simulation of Rear-end Impact Volunteer Tests	67
5.1	Reference Rear-end Impact Volunteer Tests	68
5.2	Preparations of the HBM and Seat Set-up	70
5.3	Kinematics in Ono's volunteer tests	76
5.4	Kinematics in the ADSeat volunteer tests	81
5.5	Injury Criteria	86
6	Conclusions and Outlook	91
	Appendix	95
A.1	Implementation of a Torque Actuator Between Two Vertebrae	95
A.2	Kinematics of the Detailed ViVA OpenHBM in the ADSeat Set-up	97
	Literature	111

Zusammenfassung

Fahrzeugsicherheit ist ein Thema, das uns tagtäglich im Leben begegnet. Jeden Tag sind wir, unsere Familie und Freunde Verkehrsteilnehmer, ob als Fahrzeuginsasse, Radfahrer oder Fußgänger. Leider kommt es dabei regelmäßig zu Verkehrsunfällen bei denen Personen sterben oder schwer verletzt werden. Um die Opferzahlen zu reduzieren, gibt es gesetzliche Vorschriften und Verbraucherschutzorganisationen, welche Sicherheitsstandards für die Fahrzeuge auf unseren Straßen vorschreiben beziehungsweise vorschlagen. Da der Bereich der Fahrzeugsicherheit auf Experimenten basiert und diese auch immer noch zwingend vorgeschrieben sind, werden in der Entwicklung und Überprüfung Crashtest-Dummys als Ersatzmodelle für den Insassen eingesetzt. Seit etwas mehr als 20 Jahren werden jedoch schon Computersimulationen in diesem Bereich eingesetzt und parallel dazu eine neue Klasse von digitalen Ersatzmodellen entwickelt, die Menschmodelle. Während Menschmodelle lange Zeit nur in der Forschung Anwendung fanden, sind jetzt kommerzielle Modelle verfügbar, die auch bei Fahrzeugherstellern eingesetzt werden. Gleichzeitig gab es große Fortschritte im Bereich Sensorik und verfügbarer Rechenleistung in auf dem Markt befindlichen Fahrzeugen. Autonome Fahrzeuge sind zwar noch nicht verfügbar, im Bereich Fahrzeugsicherheit passiert jedoch ein Wandel von passiven hinzu aktiven Sicherheitssystemen. Passive Sicherheitssysteme, die nur im Falle eines Unfalls reagieren, werden durch aktive Systeme erweitert, die schon vor dem Aufprall reagieren oder zumindest die Wahrscheinlichkeit oder die Schwere eines Aufpralls reduzieren.

Bei niedrigen Belastungen reichen Crashtest-Dummys oder passive Menschmodelle als Ersatzmodelle für den Insassen nicht mehr aus. Bei leichten Unfällen oder in der Zeit vor dem eigentlichen Unfall, der sogenannten Pre-Crash Phase, muss die Muskelaktivität in den Ersatzmodellen berücksichtigt werden. Die Simulation von Insassenkinematik mit Hilfe von aktiven Menschmodellen ist das Thema dieser Arbeit. In dieser Arbeit wird ein Menschmodell zu einem aktiven Menschmodell erweitert. Neben der Modellierung der Muskeln selbst, sind dabei die Herausforderungen: die Muskelaktivierung und -regelung zu modellieren und die Parametrisierung und Positionierung, sowie die Anpassung der Körperhaltung des aktiven Menschmodells.

Im Hauptteil der Arbeit wird ein erweitertes Muskelmodell nach Hill als quelloffene Implementierung für den FE-Solver LS-DYNA entwickelt. Außer dem Muskel selbst, beinhaltet das Modell Bänder, Aktivierungsdynamik und Möglichkeiten zur Regelung auf unterster Ebene. Das ViVA OpenHBM, ein existierendes quelloffenes Menschmodell einer Durchschnittsfrau, wird dann mit diesem Muskelmodell ausgestattet. Außerdem erfolgt eine Anpassung des Menschmodells, so dass eine Verwendung des Vorpositionierungstools PIPER möglich ist. Das ViVA Modell ist mit einem detaillierten und einem vereinfachten Nacken verfügbar. Beide Versionen werden mit einem winkelbasierten Regler und Muskeln modelliert mit dem Standardmuskelmodell in LS-DYNA ausgestattet. Zusätzlich werden

die Modelle mit einem längenbasierten Regler und dem erweiterten Hill-Muskelmodell aufgebaut. Insgesamt werden damit vier Varianten eines aktiven Menschmodells entwickelt und mit Freiwilligenversuchen verglichen. Dazu werden zwei Serien von Freiwilligenversuchen in Heckaufprällen aus der Literatur ausgewählt und nachsimuliert. Heckaufprälle sind unter anderem Teil von Verbraucherschutztests, daher sind Daten aus Freiwilligenversuchen öffentlich verfügbar, was bei Daten aus der Pre-Crash Phase nur eingeschränkt der Fall ist. Die Belastungen bei Heckaufprällen sind aber vergleichsweise niedrig und es gibt noch offene Fragen bezüglich der Verletzungsmechanismen im Kopf- und Nackenbereich. Am Ende der Arbeit werden Verletzungswerte für das passive und aktive ViVA Menschmodell berechnet. Diese Werte werden verglichen und im Hinblick auf Qualität der Muskel- und Reglerimplementierung diskutiert.

Abstract

Vehicle safety is a topic which is present in our daily lives. Every day we, our family, our friends participate in road traffic as an occupant of a vehicle, as a cyclist or pedestrian. Unfortunately traffic accidents where people die or get injured seriously occur regularly. To reduce the number of casualties regulations and consumer ratings exist that enforce or encourage defined safety levels for vehicles on our roads. As vehicle safety was dominated by and still relies on experiments, anthropometric test devices (ATDs), commonly called crash test dummies, are used as surrogate models for the occupant in test scenarios and during development. However, since more than 20 years, computer simulations are used in this field and a new class of digital surrogate models was developed alongside, the human body models (HBMs). While HBMs were only used in research for a long time, commercial models are available now and vehicle manufacturers start to use them. At the same time, technology has advanced a lot in terms of sensors and computational power available in vehicles on the market. While fully autonomous vehicles are not yet available, a shift from passive to active safety systems is happening in vehicle safety. Passive safety systems that act only in an accident are enhanced by active systems that act prior to the impact and reduce the chances of an impact or at least its severity.

At lower loads, ATDs and passive HBMs no longer suffice to represent occupants. In low-severity impacts and pre-crash scenarios, muscle activity must be included in the surrogate models. The simulation of occupant kinematics using active human body models (AHBMs) is the topic of this thesis. Thus, a HBM is transformed into an AHBM in this thesis. The challenges beyond modelling the muscles in AHBMs are muscle recruitment or control, parametrisation and positioning or posture adjustment.

In the central part of this thesis an open-source implementation of the extended Hill-type muscle model is developed for the FE solver LS-DYNA. Besides the muscle, the model includes tendon, activation dynamics and options for low-level control. The ViVA OpenHBM, an existing open-source average female HBM, is equipped with this muscle model and enhanced to be compatible with the open-source pre-positioning tool PIPER. The ViVA OpenHBM is available with a detailed and simplified neck model. Both versions are equipped with an angle-based controller and muscles using the built-in material model of LS-DYNA, and a length-based controller using the extended Hill-type muscle model. Altogether four variants of the AHBM are developed and compared with volunteer tests. It was decided to simulate two series of rear-end impacts volunteer tests selected from the literature. Rear-end impacts are regulated, therefore volunteer data is publicly available, whereas the availability of pre-crash data is minimal. In addition, rear-end impacts happen at low speeds and open questions exist regarding the injury mechanisms in the head-neck region. At the end of the thesis, injury values are calculated for the passive and active ViVA OpenHBM. They are compared and discussed to assess the quality of the muscle and controller implementation.