

Doctoral Thesis ETH No. 15456

TOWARDS A FINITE ELEMENT HUMAN BODY MODEL FOR USE IN TRAUMA RESEARCH

A dissertation submitted to the

SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

JESS GERRIT SNEDEKER

B.S. Mechanical Engineering, Lehigh University, Bethlehem, PA, USA
M.S. Bioengineering, The Pennsylvania State University, University Park, PA, USA

born 23.10.1972

citizen of
the United States of America

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Peter Niederer, examiner
Prof. Dr. Mehdi Farshad, co-examiner
Prof. Dr. Edoardo Mazza, co-examiner

2004

ABSTRACT

Blunt abdominal trauma leads mainly to injuries of the kidney, the liver and the spleen, all of which may result in death or disability of the injured person. This dissertation describes the development and validation of realistic finite element (FE) model of the abdominal region. Such a model is critical to understanding the mechanisms of blunt impact injury. The present work gains importance given the relative paucity of abdominal impact modelling studies in the literature. In this dissertation, the main emphasis is on the kidney, for which a detailed FE model has been developed that (i) is based on realistic anatomical and mechanical properties of the involved soft tissues under dynamic loading conditions, (ii) reflects the particular location and surroundings of the kidney in the human body and (iii) is subjected to typical loading patterns derived from accidental impact situations. In addressing the issues of realistic boundary conditions and loading conditions, it was necessary to develop considerations for the neighboring abdominal organs, and ultimately the entire human body. To this end, a finite element model of the entire human abdomen was developed. The abdominal model is compatible with a prototype human body FE model (THUMS) made available by Toyota Central R&D Laboratories.

This abdominal model has been developed in stages, and these stages are described in detail in the following chapters. First, the preliminary steps in the development of a high fidelity FE model of the human kidney are described. The geometry, material properties, and the use of viscoelastic/hyperelastic constitutive equations to model realistic, rate-dependent material behavior are discussed. This preliminary model consists solely of the renal parenchyma, with no consideration given to the blood vessels, renal capsule, or urine collection system.

Next, in order to create a more realistic model, the strain-rate dependent mechanical properties of the renal capsule were measured and appropriate rate dependent constitutive equations were developed. This dissertation describes the dynamic mechanical testing of the porcine renal capsule, as well as presents a quasi-static comparison with the corresponding human tissue.

Many global injury criteria have been suggested for blunt abdominal impact, including force criteria, compression criteria, and viscous criteria. The establishment of failure criteria for individual abdominal organs is less prevalent. This dissertation also describes work performed in an attempt to quantify a failure threshold for the kidney in terms of strain-energy density. High-speed impact tests were performed using falling weights and pneumatically driven projectiles. The strain-energy failure threshold of the kidney is identified, and a quantitative comparison between porcine and human tissues is made using quasi-static compression tests. The previously developed model of the right kidney parenchyma, with additional considerations for the renal capsule, calyces, veins and arteries, is used to explore the resulting strain-energy distributions of the whole organ experiments. A relationship is

established between impact tests on excised tissue samples, and impact tests on whole, perfused organs. Potential renal injury mechanisms are also identified.

Next, the dissertation introduces the Toyota Total Human Model for Safety (THUMS) as it was implemented in a parallel study performed on pedestrian impact. In this chapter, the structure and material properties of the THUMS are described, and a typical example for which the model may be applied is illustrated. This work is particularly relevant to the dissertation since the ETH renal model is ultimately inserted into this detailed human body FE model. Such models permit a realistic application of traumatic loads and boundary conditions to the kidney that would be otherwise difficult to represent in an isolated finite element model of the renal system.

Finally, the dissertation presents the development and validation of a model of the human abdominal region specifically suited for use in investigating renal trauma. The default THUMS abdominal model is replaced with a model of the abdomen that is divided into compartments which represent the anatomical segmentation of the abdominal cavity. The model is validated in lateral impact using experimental results from human cadaver impact tests. Possible renal injury mechanisms are explored and discussed.

ZUSAMMENFASSUNG

Ein stumpfes Bauchtrauma führt oftmals zu Verletzungen von Niere, Leber und Milz und kann den Tod oder eine bleibende Beeinträchtigung der verletzten Person zur Folge haben. Um die Mechanismen, die zu solchen Verletzungen führen können, zu verstehen, ist die Entwicklung eines exakten und realistischen Finite Elemente (FE) Modells des Abdomens wichtig. Da nur wenige Studien zur Modellierung des stumpfen Bauchtraumas bekannt sind, kommt dieser Arbeit daher eine gesteigerte Bedeutung zu.

Der Schwerpunkt dieser Dissertation liegt in der Modellierung der Niere, für die ein detailliertes FE Modell entwickelt wurde. Dieses Modell basiert auf realistischen anatomischen und mechanischen Eigenschaften des Gewebes unter dynamischer Belastung. Zudem wurde die spezifische Lage und Umgebung der Niere im menschlichen Körper berücksichtigt und es wurden typische Belastungsmuster verwendet, wie sie auch bei Verkehrsunfällen auftreten. Die Berücksichtigung von realistischen Randbedingungen und Lastfällen erforderte es, die benachbarten Organe des Abdomens sowie letztlich den ganzen Körper in die Modellierung miteinzubeziehen. Zu diesem Zweck wurde ein erweitertes FE Modell des gesamten menschlichen Abdomens entwickelt. Dieses ist mit einem von den Toyota Central R&D Laboratories zur Verfügung gestellten Prototyp eines FE Modells des menschlichen Körpers kompatibel.

Das Modell des Abdomen wurde in mehreren Stufen entwickelt, die im Folgenden ausführlich beschrieben werden. Zu Beginn werden die der Entwicklung eines detaillierten FE-Modells vorausgehenden Schritte beschrieben. Die Geometrie der menschlichen Niere sowie deren Materialeigenschaften werden vorgestellt. Zudem wird die Verwendung von visko- bzw. hyperelastischen Grundgleichungen zur Beschreibung eines zeitabhängigen Materialverhaltens diskutiert. Das auf dieser Stufe entwickelte FE- Modell besteht dabei ausschliesslich aus dem Parenchym der Niere. Die Blutgefässe, die Nierenkapsel sowie das urinsammelnde System wurden nicht berücksichtigt.

Um das Modell realistischer zu gestalten, wurden in einem nächsten Schritt die dehnungs- und zeitabhängigen Materialeigenschaften der Nierenkapsel experimentell bestimmt. Die entsprechenden Gleichungen zur Beschreibung dieses Verhaltens wurden hergeleitet. Die Durchführung dynamischer Tests zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften der Nierenkapseln eines Schweins wird ebenso beschrieben wie ein quasi-statischer Vergleich mit entsprechendem menschlichen Gewebe.

Zur globalen Quantifizierung stumpfer Bauchtraumen sind diverse Verletzungskriterien vorgeschlagen worden, die u.a. Kraft, Kompression und Viskosität berücksichtigen. Für das Versagen einzelner Organe des Abdomen wurden hingegen nur wenige Kriterien definiert. Die vorliegende Arbeit

beschreibt einen Versuch, mit Hilfe der Verzerrungsenergiedichte einen Kennwert für das Versagen der Niere zu bestimmen. Hierzu wurde das Gewebe mittels Fallgewichten und pneumatisch beschleunigten Projektilen beansprucht und die entsprechende Energie, die zum Versagen des Nierengewebes führte, ermittelt. In zusätzlichen quasi-statischen Kompressionsversuchen wurde menschliches Gewebe mit solchem vom Schwein quantitativ verglichen.

Um auch die Nierenkapsel, die Nierenkelche sowie die venösen und arteriellen Gefäße zu berücksichtigen wurde das zuvor entwickelte Modell des Parenchyms entsprechend ergänzt und dann zur Untersuchung der Verzerrungsenergie des gesamten Organs verwendet. Es wurde eine Beziehung zwischen Versuchen an exzidierten Gewebeproben und solchen an ganzen, künstlich durchbluteten Organen erarbeitet.

Im nächsten Teil der Dissertation wird das Toyota Total Human Model for Safety (THUMS) vorgestellt. Dieses Modell wurde in einer parallel durchgeführten Studie zu Fussgängerkollisionen eingesetzt. Die Materialeigenschaften von THUMS sowie ein typisches Anwendungsbeispiel werden präsentiert. Um eine für die Niere realistische Simulation von verletzungsinduzierenden Situationen zu ermöglichen, soll das oben beschriebene Nierenmodell in dieses detaillierte menschliche Ganzkörpermodell eingefügt werden.

Abschliessend wird die Entwicklung und Validierung eines Modells des menschlichen Abdomen vorgestellt, welches sich insbesondere zur Untersuchung von Nierenverletzungen eignet. Ein unterteiltes Modell des Abdomen ersetzt dabei das ursprüngliche im THUMS-Modell verwirklichte Abdomen. Die verwendeten Unterteilungen entsprechen der anatomischen Segmentierung der Bauchhöhle. Das erhaltene Modell wurde für Seitenanprall-Situationen mit Resultaten aus Leichenversuchen validiert. Mögliche Mechanismen, die zu Nierenverletzungen führen können, wurden untersucht und diskutiert.