Streszczenie

Tętniak aorty brzusznej jest jedną z częstszych przyczyn zgonów osób powyżej 65 roku życia. Istotna zatem jest diagnostyka i prawidłowe postępowanie w przypadku wystąpienia tego schorzenia. Leczenie tętniaka oparte jest o inwazyjny zabieg chirurgiczny, który, z uwagi na zaawansowany wiek pacjentów, niesie ze sobą wysokie ryzyko powikłań okołooperacyjnych. W związku z tym, interwencja chirurgiczna jest uzasadniona wtedy, gdy ryzyko śmierci w wyniku pęknięcia naczynia jest wyższe niż prawdopodobieństwo wystąpienia komplikacji okołozabiegowych. Warto zaznaczyć, iż istotna część tętniaków pozostaje stabilna do naturalnej śmierci chorego, a zatem nie ma konieczności przeprowadzania operacji naprawczych u każdego zdiagnozowanego pacjenta. Aktualnie stosowanym kryterium niestabilności tętniaka jest jego maksymalna poprzeczna średnica przekraczająca 5,5 cm. Jednakże liczne obserwacje kliniczne wykazały, że tętniaki o mniejszej średnicy ulegają pęknięciu na tyle często, iż należy szukać innych wskaźników umożliwiających właściwą predykcję zachowania się omawianego, patologicznego naczynia. Sposobem na uwzględnienie osobniczych czynników jak wielkość, kształt czy kompozycja tętniaka jest zastosowanie komputerowej analizy mechanicznej, której celem jest wskazanie miejsca oraz ryzyka pęknięcia tętniaka aorty brzusznej. Podejście to wykorzystuje metodę elementów skończonych, szeroko znaną i stosowaną m.in. w zagadnieniach wytrzymałościowych. Z uwagi na stosowanie uproszeń względem modelu naczynia oraz statystycznych danych materiałowych problem weryfikacji tak skonstruowanego przedmiotu analizy mechanicznej wciąż pozostaje otwarty.

W rozprawie zaprezentowano metodę walidacji symulacyjnej analizy wytrzymałościowej tętniaka, bazującą na możliwości zarejestrowania kształtu aorty w dowolnym momencie cyklu pracy serca za pomocą bramkowanej tomografii rezonansu magnetycznego (ang. *MRI*). Prezentowana metoda wykorzystuje geometrię tętniaka zrekonstruowaną na podstawie obrazowania podczas rozkurczu serca (minimalne obciążenie aorty) jako dane poddawane analizie oraz skurczu serca (maksymalne obciążenie aorty) jako informacje referencyjne. Warto podkreślić, iż aorta zarejestrowana w dowolnym momencie, będzie poddana działaniu ciśnienia krwi. Z punktu widzenia prawidłowo przeprowadzonej analizy wytrzymałościowej

ważne jest zatem by najpierw doprowadzić model tętniaka do stanu zerowego obciążenia, a następnie, tak przygotowany obiekt, poddać działaniu pełnego (systolicznego) ciśnienia krwi. Ostatecznie, rezultat symulacji porównywany jest z rzeczywistym modelem pozyskanym z obrazowania w fazie skurczu serca.

W efekcie metoda pozwala na ocenę zasadności stosowania numerycznej symulacji do analizy mechanicznej tętniaków aorty oraz na analizę adekwatności przyjętego modelu naczynia, zarówno w kontekście dokładności reprezentacji geometrii naczynia, jak i stosowanego modelu materiałowego.

Rozprawa prezentuje kompletny ciąg przetwarzania i analizy danych pozyskiwanych z MRI:

- Półautomatyczną segmentację skanów wykorzystującą model aktywnych konturów
- Autorską metodę filtracji segmentowanych konturów i rekonstrukcji 3D tętniaka
- Estymację kształtu tętniaka przy zerowym obciążeniu (ang. *prestressing*)
- Numeryczną symulację i analizę jej błędu.

W rozprawie przedstawiono szereg eksperymentów, w których wykorzystano prezentowaną metodę. Analizie poddano wyniki obrazowania 11 pacjentów ze zdiagnozowanym tętniakiem aorty brzusznej oraz 7 pacjentów z fizjologiczną aortą. W obu przypadkach przebadano wpływ złożoności przyjętego modelu materiałowego (elastyczny izotropowy oraz hiperelastyczny izotropowy i anizotropowy) na dokładność analizy. W przypadku analizy tętniaków zbadano również wpływ uwzględnienia w modelu warstwy skrzepliny.

Abstract

The abdominal aorta aneurysm (AAA) is one of the most frequent causes of death among people older than 65 years. Therefore, in case of this disease a proper diagnostic is of utmost importance. The therapy of AAA is based on an invasive procedure, which, due to the patients advanced age, involves high risk of post-surgery complications. Therefore, the surgical procedure is justified if and only if the risk of dying due to the rupture of AAA is higher than the probability of post-surgery complications. It is worth noting, that a large number of AAAs remains stable until the natural death of the patient, thus it is not necessary to perform a repair surgery on every patient diagnosed with AAA. The currently used criterion for assessing the stability of an AAA is its maximal transverse diameter exceeding 5.5 cm. However, numerous clinical observations showed, that AAAs with a smaller diameter rupture frequent enough to justify search for other methods capable of predicting the behavior pathological vessel. One potential method of achieving that, while taking into account individual patient's characteristics such as the size, shape or composition of the AAA, is the numerical mechanical analysis. This approach is based on the Finite Elements Analysis (widely used in mechanical applications) to predict the spot and risk of an AAA's rupture. Due to the necessary simplifications of the AAA's model and the statistical character of the material properties used the verification of such an approach remains an open problem.

The thesis presents a validation method of the simulation-based mechanical analysis of AAA based on the ability to register the shape of the aorta at any moment of the cardiac cycle by using gated Magnetic Resonance Imaging. The proposed method uses the geometry of the aneurysm estimated according to images registered during the diastolic phase (minimum blood pressure). This geometry is then subject to the numerical simulation and the results of this simulation are compared with the geometry reconstructed from images registered during the systolic phase (maximum blood pressure) as reference. It is worth noting that an artery registered at any given moment is affected by a blood pressure. From the perspective of a properly conducted mechanical simulation it is thus important to first bring the model to the zero-pressure state, and then to subject such a prepared object to the full systolic blood pressure.

Finally, the resulting geometry is compared with a real model based on the date registered with gated MRI during the contraction phase of the cardiac cycle.

As a result, the method allows for assessing the reasonability of using numerical simulations for mechanical analysis of aortas and AAAs behavior as well as for assessing the adequacy of the assumed vessel model, both in terms of the geometric reconstruction and the representation of materials used.

The thesis presents a complete pipeline for processing and analyzing data registered with MRI:

- Semi-automatic segmentation of the individual scans based on the Active Contour method
- A newly proposed method for filtration of the segmented contours and 3D reconstruction of the AAA
- Estimation of the AAA's geometry under zero-pressure (pre-stressing)
- Numerical simulation and analysis of its residual error.

A number of experiments have been presented in the thesis. Results of imaging examination of 11 patients with diagnosed AAA and 7 patients having a physiological aorta have been processed and analysed. In both cases, the influence of the complexity of the material model (elastic, hyperelastic - both isotropic and anisotropic) on the accuracy of the analysis has been assessed. In the case of AAAs the influence of including the intraluminar thrombus layer (ILT) in the model has been evaluated as well.