



**Silesian
University
of Technology**

Marcin Nowak

**Development of numerical model for modeling
artificial heart valves for performing virtual
therapies**

PhD thesis

Supervisor:

Wojciech Adamczyk, PhD, DSc, Assoc. Prof.

Co-supervisor:

Eduardo Divo, PhD, Prof.

Silesian University of Technology

Gliwice, 2022

Abstrakt

Budowa modelu matematycznego na cel modelowania numerycznego sztucznych zastawek wykorzystywanego w wirtualnych zabiegach chirurgicznych

Słowa kluczowe: zastawka aortalna, hemodynamika, siatka ruchoma i odkształcalna, interakcja płyn-ciało stałe, numeryczna mechanika płynów, tętnica wieńcowa, przepływ krwi, zwapnienie, wirtualny zabieg chirurgiczny, walidacja modelu numerycznego, stanowisko testowe, widzenie komputerowe

Choroby zastawek są dominującą grupą wśród schorzeń układu krwionośnego. Mogą wystąpić jako choroby wrodzone lub pojawiają się wraz z wiekiem. Najczęstszą chorobą zastawki jest zwapnienie zastawki aortalnej, sięgające 13% populacji powyżej 65 roku życia. Dla pacjentów w zaawansowanym stadium, wszczepienie protezy jest jedynym rozwiązaniem, jednakże może to prowadzić do licznych komplikacji. Ogromny potencjał jest widziany w rozwoju podejścia łączącego echokardiografię z zaawansowanym modelem numerycznym. W pracy doktorskiej zastosowano różne podejścia do modelowania ruchomych, sztywnych lub odkształcalnych struktur, jak zastawka anatomiczna i sztuczna. Wykorzystano różne sposoby realizacji ruchomej siatki numerycznej. Wyniki modeli zwalidowano na stanowisku laboratoryjnym oraz przy użyciu danych fizjologicznych. Stanowisko laboratoryjne było wyposażone w pompę pulsacyjną, kamerę szybką, przepływomierz, przetworniki ciśnienia oraz specjalny stelaż zaprojektowany na cel pomiarów. Model matematyczny obejmował rozwiązanie fizyki obecnej po stronie płynu i ciała stałego, jak również wzajemną interakcję pomiędzy tymi stronami. Równania przepływowe zawierały równania różniczkowe cząstkowe Naviera-Stokesa, równania turbulencji i model Windkessela dla warunku brzegowego, stworzony na bazie analogii elektrycznej. Zaimplementowano również model cieczy nie-Newtonowskiej Carreau do procedury obliczeniowej. Po stronie ciała stałego, wykorzystano równania mechaniczne, pozwalające na wyznaczenie zmiennych w czasie deformacji. Dla ciał nieodkształcalnych, zaimplementowano model własny wyznaczający ich ruch wskutek ruchu płynu. Praca sztucznej zastawki została przeanalizowana przy jej wirtualnym wszczepieniu do rzeczywistej geometrii naczyń pacjenta. Zaimplementowano model własny wyznaczający ruch sztucznej zastawki. Stworzono algorytm do przetwarzania danych z kamery szybkiej, do wyznaczania kąta nachylenia płatów oraz stopnia otwarcia zastawki. Dwustronny model interakcji płyn-ciało stałe został wykorzystany do modelowania zastawki anatomicznej, z wykorzystaniem nowego sposobu realizacji siatki ruchomej. Zbadano wpływ procesu gromadzenia się blaszki miażdżycowej na pracę zastawki anatomicznej oraz sztucznej.

Abstract

Development of numerical model for modeling artificial heart valves for performing virtual therapies

Keywords: aortic valve, hemodynamics, moving deforming mesh, fluid-structure interaction, CFD, coronary artery, blood flow, calcification, virtual therapy, test rig, computer vision

Aortic valve disease is one of the most common cardiovascular disease; they can be divided into congenital defects, such as bicuspid aortic valve, or they appear as a disease with aging. The most common valvular disease is calcified aortic valve disease, reaching 13% in the general population over 65 years. For patients with advanced calcification stage, artificial aortic valve implantation is the only option, however this can lead to medical complications. There is a large potential in the development of a hybrid approach that combines fast echocardiography with an advanced numerical model.

In the Thesis different approaches for the modeling the movable, rigid and deformable structures, as human and artificial valves were used. Different moving mesh approaches were used and their results and validity were compared. The numerical results were compared with those obtained via measurements, performed using the in-house test rig, also physiological data were used for such purpose. Laboratory test rig included the pulsatile blood pump, fast camera, mass flow meter, pressure transducers and valve holder designed for the measurements.

The mathematical model comprise the solving of the physics present on the fluid and the solid side, also the interaction between those two participants. The fluid equations included the partial-differential Navier-Stokes equations, turbulence model and Windkessel model for outflows, created based on the electrical analogy. Also, the non-Newtonian viscosity model had to be implemented into solution procedure. On the solid side, the structural governing equations were applied, which allowed to calculate the transient deformation fields. For the rigid bodies, the inhouse model was implemented into the fluid solver to determine their motion.

The synthetic valve operation was analyzed after its virtual implantation in the real patient vasculature geometry. The inhouse model for determining the transient angular leaflet motion was implemented. The inhouse algorithm was developed, to automatically determine the angular positions of the rigid-leaflet valves and valve opening of the elastic-leaflet valve, from the large set of the images. The two-way partitioned fluid-structure interaction model was applied for modeling of the elastic human valve. The novel, advanced moving mesh model was used. The impact of calcification process onto natural and artificial aortic valves was assessed and compared.