

Oponentský posudek diplomové práce
Aleny Jarolímové
Magnetická rezonance a výpočetní hemodynamika

Obsah práce

Předložená diplomová práce se zabývá prouděním krve v sestupné aortě. V tomto případě se reálná geometrie získává z magnetické rezonance a je využívána pro numerickou simulaci toku krve, jejíž výsledky jsou porovnávány s rychlostním polem získaným též pomocí magnetické rezonance.

Dosažené výsledky. Diplomová práce se skládá ze tří částí. V první kapitole diplomantka představila bilanční rovnice spolu s konstitutivním vztahem pro newtonskou tekutinu vhodnou k popisu rychle proudící krve v sestupné aortě. Dále představila okrajové podmínky: Na stěně předepisuje okrajovou podmínku typu Navierova skluzu; na vtoku analytické řešení Poiseuilleova proudění konzistentního s předepsanou okrajovou podmínkou na stěnách; na výtoku pak směrovou do-nothing podmínku. Dále sestavila slabou formulaci odpovídající danému problému a ukázala Nitscheho metodu pro implementaci okrajových podmínek. Nakonec představila konečně-prvkovou aproximaci slabé formulace; jako časové schéma se používá Crankovo-Nicolsonové schéma, nelinearity se řeší pomocí Newtonovy metody. Oblast je aproximována pomocí čtyřstěnů a jako konečné prvky jsou použity Mini elementy.

Druhá kapitola se zabývá získáním geometrie a rychlostního pole ze dvou sad dat magnetických rezonancí. První sada dat s vyšším rozlišením se používá k získání geometrie sestupné aorty, k tomu se využívá VMTK software, který k segmentaci oblasti používá level-set metodu. Pro inicializaci se využívá metoda Colliding Fronts, pro získání lepšího výběru oblasti se pak numericky dále řeší level-set s upravenou pravou stranou. Nakonec se povrch aorty ještě zhladí a vtok a výtok prodlouží rovnou trubici, poté se vygeneruje síť skládající se ze čtyřstěnů. Následně se z druhé sady dat získává rychlostní pole. Zde nastává problém, že data jsou dána v různých systémech souřadnic, a aby bylo možné naprojektovat rychlosti do získané sítě, je třeba soustavy správně natočit a přeškálovat. Poté studentka popsala limity magnetické rezonance, kdy jsou data průměrována jak v prostoru přes voxely, tak v čase mezi jednotlivými časovými kroky. Dále popsala problém aliasingu vycházející z principu fungování magnetické rezonance. Nakonec z dat rychlostního pole přečetla nátokovou rychlost, která je předepisována na vtoku.

Třetí kapitola se zabývá trojrozměrnou simulací toku krve v získané reálné geometrii. Diplomantka studovala vliv koeficientu Navierova skluzu v okrajové podmínce na stěně na řešení problému a hledala, pro který koeficient se numerické řešení nejlépe shoduje s magnetickou rezonancí. Srovnání jsou prováděna ve dvou časech – střední systole (nejvyšší rychlost) a pozdní systole (časový krok těsně před koncem systoly). Chyba numerické simulace se počítá jako relativní L^2 norma rozdílu mezi naměřenými daty a numerickou v simulaci ve čtyřech různých řezech. Ukazuje se, že chyba je nejmenší pro dokonalý skluz a pro často používanou no-slip okrajovou podmínku je nejvyšší.

Přínos autora. Přínos autorky práce je dvojitý. Jednak sestavila systematický návod, jak z dat magnetické rezonance získat geometrii a tu osíťovat a jak data rychlostního pole naprojektovat na tuto síť. Dále pak ukázala, že pro danou nátokovou podmínku použitá no-slip okrajová podmínka nedává tak dobrou shodu s experimentem jako podmínka Navierova skluzu s jinými hodnotami skluzových koeficientů.

Hodnocení práce

Věcná kvalita práce. Práce je obsahově velmi zdařilá, obsahuje jen pár drobných nepřesností. V první kapitole je napsáno, že tekutina je nestlačitelná, ale chybí explicitní zmínka, že hustota je konstantní. U Nitscheho metody by bylo vhodné zahrnout i motivaci toho, jak získat její slabou

formulaci a proč funguje, a ne ji jen představit. Ve druhé kapitole by bylo dobré vysvětlit, proč jsou rychlosti v datech zapsány jen pomocí celých čísel. Nakonec ve třetí kapitole v legendě u obrázku 3.9 je špatné označení jednotlivých čar ($t = 4, t = 9$).

Formální kvalita práce. Práce je napsaná pěkně a obsahuje vzhledem ke svému rozsahu velmi malé množství překlepů a typografických chyb (nalezeno 14 chyb v 51stránkové práci).

Doporučení. Předloženou práci doporučuji uznat jako diplomovou práci.

Otázky

- Data z magnetické rezonance pro rychlostní pole jsou udána ve 24 časech, které nejsou nijak zaokrouhlené. Pro numerickou simulaci se používá pevný časový krok 1 ms. Používá se pro porovnání nějaká interpolace v čase?
- Pro získání výpočetní oblasti se používá level-set, který je už z principu rozmazaný. Proč se následně oblast ještě jednou zhlazuje? Nebylo by lepší použít vyšší hodnotu parametru tloušťky rozhraní v rovnici pro level-set?
- Proč je rychlostní pole uloženo jen pomocí celých čísel?
- Je možné kvantifikovat chybu měření? Jak velký je příspěvek chyby měření vůči rozdílu řešení z numerické simulace a měřených dat?
- Je krev během diastoly částečně nasávána (rychlost na vtoku záporná) jako je na obrázku 3.3? Jak tomu pomáhá směrová výtoková podmínka?

V Praze 1. července 2020
Karel Tůma
Matematický ústav Univerzity Karlovy