Oponentní posudek na disertační práci Mgr. Aleše Pecky, M.Sc.

"THE DISCONTINUOUS GALERKIN FINITE ELEMENT METHOD FOR THE SOLUTION OF FLUID-STRUCTURE INTERACTION PROBLEMS"

Disertační práce je věnována numerickým metodám pro řešení proudění stlačitelné tekutiny a její interakce s pružnými tělesy. Provedení proudění je realizované Navierovým-Stokesovým systémem parciélních diferenciálnich rovnic spolu s počátečnými a okrajovými podmínkami. Uvažují se dvojdimensionálni i třídimensionální oblasti. Zmíněné systémy jsou řešené numerickými metodami. V práci jsou uvedené tři parciální diferenciální metody, konkrétně, metodou konečných prvků, kombinací konečných sítí (tzn. metody konečných diferencí) s metodou konečných prvků a nespojitá Galerkinova metoda. Tato poslední metoda je velmi efektivní. Mimo jiné je možné aplikovat ji k řešení problémů v oblastech závislých na času. To je velmi výhodné pro řešení FSI problemů, tj. interakcí tekutin a pružných těles. V tomto případě je možné použít aplikaci metody ALE (Arbitrary-Lagrangean-Eulerian). Práce se zabývá nejen standardním prouděním, ale je uvažováno i turbulentní proudění použité Spalart-Allmaras modelem. Modely a jejich numerická řešení jsou testované pomocí měření z Ústavu termomechniky Akademie věd České republiky a pomocí benchmarků.

Práce je napsána kvalitní angličtinou, kterou jsou pečlivě popsány použité modely. Práce ale neobsahuje matematickou teorii, což nebylo samozřejmě cílem, vzhledem k tomu, že se jedná o práci v oblasti mechaniky. Na začátku disertace je uveden abstrakt v angličtině i češkyně. Dále následují obsah, list symbolů a notace obsahující nákladní značení. Pátá kapitola se zabývá problémům proudění tekutin s pohybujícími se hranočemi. Mimo jiné, výsledky jsou porovné s experimenty z Ústavu termomechaniky pro profil NACA 0010.

Práce pokračuje osmi kapitolami, uzávěrem, seznámem literatury a autorovou literaturou0. První kapitola je podrobnou introdukcí motivu studování problematiky disertace. Druhá kapitola obsahuje matematické modely. Jsou zde uvedené Navierovy-Stokesovy rovnice, Spalart-Allmaras turbulence model. Třetí kapitola se zabývá okrajovými podmínkami. Jedná se jednak o nevazké proudění, o vazké tekutiny ale i situacemi v případě turbulentního modelu. Čtvrtá kapitola je věnována nespojité Galerkonově metodě, která je velmi efektivní pro řešení komplikovaných problémů. V této kapitole jsou uvedené výsledky získané pro obtékání leteckého profilu NACA 0012. Pátá kapitola se zabývá prouděním v oblastech s pohybývanými hranicemi oblastí obsahujícími tekutiny. Jedná se např. o chování konečných prvků kolem pohybujících se leteckých modelů nebo jiných těles. Objevují se tu i experimenty NACA0010. Šestá kapitola obsahuje interakci tekutiny a pevných těles. Je zde obsažená diskretizami a interakcemi tekutin a struktur. Je zde možné najít různá porovnání řešeních obsažených výsledků. Podobné výsledky a jejich porovné (např. Turek-Hron benchmarks) jsou obsané v sedmé kapitole. Zde lze uvidět velmi dobrou shodu mezi výsledků autora a Turka-Hrona. Poslední, osmá kapitola a devátá kapitola práci uzavírají.

Hodnocení práce

Problematika, kterou se disertační práce zabývá, je velmi zajímavá z teoretického hlediska a hraje důležitou roli z hlediska praktického. Práce obsahuje originální nové výsledky, které představují obohacení oblasti numerického řešení obtékání zahřívaných těles. Problematika disertační práce je značně rozsáhlá a technicky náročná. Je možné konstatovat, že se autor zhostil cílů práce úspěšně.

Práce je napsána anglicky, na vysoké grafické úrovni. Obsahuje řadu obrázků, které doplňují a objasňují text vhodným způsobem. Mám pouze několik otázek a připomínek:

Str. 12, 15 a dále: co je $\nabla_\alpha, \nabla^\beta$, a podobně?

Str. 40 a dále: co je ∇U, Δt_n ?

Str. 67, 71, 77, 81 a podobně: co je $\dot{d}, \ddot{d}, \dot{y}, \ddot{y}, P^{ab}_{n_b}, \nabla_b P^{ab}, {}^sE$ a podobně?

Doporučuji, aby autor při obhajobě vysvětlil zmíněné otázky.

Závěr

Předložená disertační práce má vysokou odbornou úroveň. Práce obsahuje nové a cenné výsledky, které spočívají ve formulaci komplikovaného problému, vypracování robustní numerické metody vysokého řádu přesnosti pro jeho řešení, analýzy této metody a její aplikace na řešení důležitého praktického problému. Práce má význam jak pro další rozvoj vědního oboru, tak i pro aplikace. Autor prokázal, že má předpoklady pro samostatnou tvořivou vědeckou práci.

Na základě získaných výsledků doporučuji, aby byla předložená práce uznána za disertační práci a aby po její úspěšné obhajobě byl Mgr. Alešovi Peckovi, M.Sc, udělen titul PhD.

V Praze 26. 7. 2022 Prof. RNDr. Miloslav Feistauer, Dr.Sc., dr.h.c.

Posudek disertační práce

The discontinuous Galerkin finite element method for the solution of fluid-structure interaction problems

Ing. Aleše Pecky

Obsah práce

Disertační práce se zabývá vývojem a aplikací nespojité Galerkinovy metody pro numerické řešení interakce proudící stlačitelné tekutiny s pružně uchyceným či poddajným tělesem. Nespojitá Galerkinova metoda (dále jen DGM) patří mezi velmi moderní metody pro numerické řešení parciálních diferenciálních rovnic a to speciálně pro případy úloh s nespojitostmi či s velkými gradienty ať už řešení nebo v koeficientech. Výhodou oproti běžně používané metodě konečných objemů mimo jiné vysoký řád přesnosti vedoucí v mnoha případech k vyšší efektivitě této metody.

V úvodní kapitole autor popisuje motivaci pro řešení vybraného typu úloh a věnuje se popisu jevů spojených s interakcí proudových polí s tělesy. Dále formuluje základní předpoklady, ze kterých bude práce vycházet (str. 3 – proudění stlačitelné tekutiny řešené pomocí DGM, elastické těleso s velkými deformacemi, nezávislá metoda pro numerické řešení deformací tělesa, nekonformní síť na rozhraní tekutiny a tělesa). Dále se věnuje popisu aktuálního stavu problematiky simulací tekuté a pevné fáze a jejich interakce. Na závěr úvodní kapitoly formuluje cíle práce jimiž jsou

- popis DGM ve zobecněné Lagrangeovsko-Eulerovské formulaci,
- implementace implicitní verze DGM,
- implementace stávajících či vývoj nových algoritmů pro deformaci výpočetních sítí,
- testy DGM na vybraných případech proudění se stacionární i s pohyblivou hranicí
- popis a implementace numerické metody pro řešení pohybu tuhého tělesa a deformací elastického tělesa,
- vývoj algoritmu pro řešení interakce tekutiny s tělesem,
- validace výsledné metody.

Další kapitola se věnuje popisu matematického modelu proudící tekutiny. Zde autor zvolil systém Navierových-Stokesových rovnic s termodynamickým modelem ideálního plynu. Pro případ turbulentního proudění autor volí použití středovaných rovnic kombinovaných se Spalartovým-Allmarasovým modelem turbulence.

Ve třetí kapitole autor popisuje okrajové podmínky pro případ proudění nevazké a vazké tekutiny a pro rovnice modelu turbulence.

Čtvrtá kapitola je věnována podrobnému popisu DGM od základní formulace až po realizaci implicitní metody. Pro případ vazkého proudění autor využívá tzv. metodu vnitřní penalizace. Implicitní metoda je sestavena standardním postupem vycházejícím z linearizace nelineárního algebraického systému vzniklého prostorovou diskretizací. Jakobiho matice je přitom sestavována metodou konečných diferencí (viz vzorec 4.48 na str. 41). Na závěr kapitoly autor provádí validaci vyvinutého kódu na řešení několika úloh proudění kolem 2D profilu.

V páté kapitola autor popisuje algoritmy používané pro deformaci sítí. V úvodu kapitoly je uveden přehled těchto algoritmů spolu s jejich stručným hodnocením z hlediska robustnosti. Dále autor navrhuje využití deformace sítě založené na vážených průměrech deformací hranice či na tzv. *radial basis* interpolaci. Nejedná o principiálně nové algoritmy (viz citace práce de Boera na str. 53). Autor však navrhuje jistou modifikaci metody (vzorec 5.15 na str. 54) vedoucí k výraznému zlepšení robustnosti algoritmu (viz obr. 5.6 a 5.7 na str. 55). Na závěr autor provádí validaci na případech 2D obtékání tuhých těles s předepsaným pohybem (např. kmitající profil).

Šestá kapitola je věnována problému interakce tekutiny s pružně uchyceným tělesem. Autor zde používá přístup, kdy řeší odděleně pomoci DGM proudové pole a pomoci Adamsovy-Bashforthovy metody pohyb tuhého tělesa. Vzájemnou interakci pak realizuje pomocí silné či slabé vazby. Na závěr této kapitoly provádí validaci pro případ obtékání válečku a dále vyšetřuje hranici aerodynamického flutteru. V obou případech se ukazuje, že získané numerické výsledky odpovídají jak experimentálním datům, tak výsledkům z dostupné literatury. Případné rozdíly (viz např. hranice flutteru na obr. 6.8) autor v textu řádně komentuje.

V sedmé kapitole se autor zabývá interakcí s poddajným tělesem. Deformaci tělesa přitom řeší pomocí standardní metody konečných prvků. Vazba mezi problémem proudění tekutiny a deformací tělesa je realizována pomocí okrajových podmínek na rozhraní. Zde autor používá interpolace pomocí *radial basis* funkcí což usnadňuje použití nekonformních sítí. Při interakci se opět uvažuje buď silná nebo slabá vazba. V závěru kapitoly je prezentována validace pro případ obtékaní válečku s pružným nosníkem.

V osmé kapitole je stručně zmíněna paralelizace DGM a je provedeno měření účinnosti paralelizace na počítačích s distribuovanou a se sdílenou pamětí.

Na závěr autor shrnuje dosažené výsledky a naznačuje další možnosti rozvoje metody.

Hodnocení práce

Práce je napsána v anglickém jazyce s naprostým minimem chyb či překlepů. Po formální stránce nelze práci nic vytknout. Text je srozumitelný, obrázky a grafy jsou volené vhodně a jejich popisy jsou dobře čitelné. Práce je uvozena seznamem značení které odpovídá běžně používaným standardům. Práce jiných autorů jsou v textu řádně citovány a během čtení jsem nenalezl žádné příznaky porušeni publikační etiky.

Po stránce obsahové bych chtěl zdůraznit, že téma interakce tekutiny s tělesem je velmi komplikované a autor se jeho řešení zhostil dle mého názoru velmi dobře. Přesto jsou v práci některé nedostatky:

- mezi cíly práce se na str. 7 uvádí implementace DGM. Z textu není zřejmé, zda se jedná o novou implementaci či o doplnění stávajícího softwaru vyvíjeného na FAV (FlowPro).

- v zápisu Navierových-Stokesových rovnic na str. 13 autor používá tenzorovou symboliku. Bohužel však symetrickou část tenzoru rychlosti deformace (strain rate tensor) autor zapisuje někdy v kovariantním tvaru, někdy ve smíšené formě a někdy v kovariantním tvaru (viz vzorce 2.24, 2.25 a 2.27). To může vést k určitému zmatení čtenáře.
- v kapitole věnované okrajovým podmínkám autor na několika místech zmiňuje extrapolaci z proudového pole. Extrapolace ale není okrajová podmínka! Je to přinejlepším v některých popis realizace homogenní Neumannovy podmínky. Dále je pro případ pevné stěny u vazkého proudění uvedena adiabatická podmínka (tj. Neumannova podmínka pro teplotu) a dále jsou zde uvedeny „okrajové podmínky" pro tlak a hustotu. Tyto veličiny jsou ale svázány pomocí stavové rovnice!
- text na straně 27 se zřejmě nevztahuje k okrajovým podmínkám pro model turbulence.
- na str. 30 je zřejmě překlep ve vzorci 4.7, místo znaku pro parciální derivaci má být asi gradient.
- na str. 33 autor uvádí doporučenou hodnotu λ_{IP} kolem jednotky. Tato volba je však platná pouze pro případ vhodně normovaných bezrozměrných rovnic. Obecně by λ_{IP} mělo být ~ v+a.
- na str. 41 je uveden vztah pro výpočet Jakobiho matice pomocí konečných diferencí (vzorec 4.48). Tento postup však může být výpočetně velmi náročný. Mohl by autor při obhajobě uvézt kolik procent času se při běžném výpočtu stráví sestavením této matice?
- při popisu testovacího případu na str. 44 autor zmiňuje, že profily NACA mají ostrou odtokovou hranu. Tak tomu ve skutečnosti není. Ostrou odtokovou hranu mají profily modifikované pro usnadnění numerických simulací.
- autor u řešených případů neuvádí řád přesnosti či stupeň q bázových funkcí. To se týká prakticky všech řešených případů. Dále se nezmiňuje o problémech s aproximací křivočarých hranic.
- pro případ turbulentního obtékání profilu (kapitola 4.9.2) autor neuvádí velikost buňky sousedící se stěnou. Čtenář tak nemá možnost posoudit vhodnost použití modelu turbulence bez stěnových funkcí.
- u případů interakce proudící tekutiny s tělesem není jasně uvedeno, zda byl použit algoritmus silné či slabé vazby.
- deformace elastického tělesa jsou řešeny pomocí metody konečných prvků. V jejím popisu autor uvádí využití polynomiální báze stupně q, viz vztah 7.5 na str. 82. Opravdy byly pro simulaci elastického tělesa použity prvky vyššího řádu přesnosti (q>1)? V textu není opět řád přesnosti zřetelně uveden.

Dále není z textu jednoznačně zřejmé, co je vlastním přínosem doktoranda a co je využití existujícího softwaru či známých metod. Doporučoval bych proto doktorandovi, aby při obhajobě jasně vymezil vlastní přínos.

I přes výše uvedený seznam nedostatků považuji práci za velmi kvalitní. Dosažené výsledky jednoznačně dokumentují vhodnost zvolené metody a její použitelnost pro řešení určitých typů úloh. Proto práci **doporučuji k obhajobě** a navrhuji, aby byl doktorandovi po úspěšné obhajobě udělen titul PhD.

V Praze dne 6.5.2022

Prof. Ing. Jiří Fürst, PhD.