

Prof. Ing. Jiří Křen, CSc.
Katedra mechaniky
Fakulta aplikovaných věd
Západočeská univerzita v Plzni
Univerzitní 22
306 14 Plzeň

OPONENTSKÝ POSUDEK

disertační práce pana **Ing. Jaroslava Štorkána**
nazvané

Návrh výpočetních postupů pro redistribuci akustické energie v hlasovém projevu člověka

Disertační práce Ing. J. Štorkána se zabývá aktuálním problémem analýzy akustických vlastností vokálního traktu člověka. Nejedná se o vytvoření univerzálního modelu vokálního traktu, ale o sestavení výpočtově efektivních matematických modelů, které umožní počítačovou simulaci lidské fonace. Hlavním cílem disertační práce je snížit výpočtovou náročnost modelů vokálního traktu člověka.

Práce o 174 stránkách je rozdělena do 9 kapitol. Dále je doplněna přehledem použité literatury, publikacemi autora v oblasti lidské fonace, ostatními publikacemi autora, seznamem obrázků, tabulek a použitých symbolů a zkratk. V úvodu autor stručně vyjadřuje motivaci k vypracování disertační práce a zařazuje svoji práci do řešené problematiky. Kapitola 2 je věnována podrobně přehledu současného stavu řešené problematiky. Dále je zde uvedena základní biomechanika vokálního traktu včetně průtoku vzduchu tímto traktem. Je zde dále zmíněn sluch, formanty a jsou uvedeny základní rovnice akustiky. Důležitou částí této kapitoly je vytvoření 1D modelu vokálního traktu (soustava válců a kuželů) a řešení vlnové rovnice na tomto modelu. Závěr kapitoly je potom věnován aplikaci MKP modelu na řešení úloh akustiky včetně frekvenční analýzy a redukce stupňů volnosti příslušného modelu (modální, Guyanova a IRS redukce). Kapitola 3 definuje explicitně cíle disertační práce. Kapitola 4 představuje teoretický základ konstrukce vhodného konečného prvku pro modelování vokálního traktu. Je zde uveden izoparametrický konečný prvek, který vychází z nelineárního trojúhelníkového elementu lineárně vysunutého do prostoru. Je zde ukázána technika eliminace tvarových funkcí vnitřních uzlů na obvodové uzly (z pohledu aplikace MKP) a zkoumána podmíněnost příslušné transformace. Nakonec je zde uvedena numerická integrace příslušných funkcí na těchto prvcích (Gaussova integrační schémata). Kapitola 5 definuje geometrický model vokálního traktu bez uvažování kavit. Vychází se z CT vyšetření geometrie traktu („geometrie“ hlásky „a“) a prezentuje se postup modelování vokálního traktu jako 1D kontinua (válcové a kuželové části, analytický model) a aplikace speciálního typu konečného prvku (16 řezů, tedy 15 vrstev prvků, optimalizovaný MKP model). Kapitola 6 je věnována základním akustickým analýzám vyvinutých modelů vokálního traktu. Dále je zde zkoumána citlivost modelů na vstupní parametry a zrealizována simulace fonace. Závěrem je potom pojednáno o tvarové optimalizaci modelů. V kapitole 7 dále autor rozšiřuje geometrii modelů fonace o paralelní kavitace a uvádí vliv kavit na akustické vlastnosti vokálního traktu

(vlastní frekvence a vlastní tvary kmitu). Následuje opět tvarová optimalizace (genetické algoritmy) a závěr kapitoly je věnován modelování pěveckého formantu. V kapitole 8 autor ukazuje na přínosy své práce pro vědu a praxi. Závěr disertační práce (kapitola 9) je nakonec věnován celkovému shrnutí dosažených výsledků a naznačení možného dalšího postupu prací v modelování vokálního traktu člověka.

Dosažení v disertaci stanoveného cíle

Cíle disertace včetně formulace základních problémů a požadavků na zvolený model vokálního traktu člověka jsou uvedeny v kapitole 3 předložené práce. Pro naplnění těchto cílů zvolil disertant dva, resp. tři, geometricky vhodné fyzikální model – 1D model na bázi válců a kuželů (metoda přenosových matic), 3D model na bázi vyvinutého speciálního konečného prvku, resp. 3D „klasický“ model MKP v prostředí ANSYS. Metody řešení aplikuje na tvarově různé a tvarově optimalizované fyzikální modely vokálního traktu při fonaci samohlásky „a“. Práce je celkem vyvážená a je doplněna seznamem obrázků a použitých symbolů. Dosažené výsledky jsou převážně graficky zpracované.

Úroveň rozboru současného stavu v disertaci řešené problematiky

Rozbor současného stavu modelování vokálního traktu je uveden především v kapitole 2. Zde disertant uvádí význam této problematiky a uvádí odkazy na nejznámější práce v této oblasti. Úroveň rozboru současného stavu řešení je přiměřená. Samozřejmě jeho výklad je veden cílem práce a odkazy na významné práce jsou součástí i dalších kapitol práce. Svůj přehled o používaných metodách a základních literárních zdrojích v oblasti modelování vokálního traktu člověka dokládá dostatečným počtem relevantní literatury.

Teoretický přínos disertační práce

Hlavní teoretický přínos v řešené problematice představuje konstrukce speciálního konečného prvku pro numerické řešení akustiky vokálního traktu mezi hlasivkami a ústy. Funkce hlasivek je nahrazena objemovými pulzy na bázi Liljencrantsova-Fantova modelu. Do teoretické části práce lze zahrnout i metody redukce počtu stupňů volnosti matematických modelů vokálního traktu a popis jejich pozitiv i negativ. Jedním z přínosů je rovněž aplikace genetických algoritmů pro optimalizaci tvaru geometrie traktu a vliv geometrických modifikací vokálního traktu na frekvenční spektrum hlasu. Nedílnou součástí této oblasti je i analýza možností vzniku pěveckého formantu, kde se potvrdila hypotéza o souvislosti pěveckého formantu s velikostí průřezu vokálního traktu a piriformních sínů. Je třeba zdůraznit, že disertant svými výsledky potvrdil oprávněnost použitých metod řešení včetně citlivostní analýzy modelů.

Praktický přínos disertační práce

Z hlediska dopadu výsledků disertační práce do praxe lze předloženou práci hodnotit rovněž kladně. Např. navržený a odzkoušený speciální nový konečný prvek podstatně snižuje výpočtovou náročnost modelu vokálního traktu. Dále je nutno zmínit 1D fyzikální model vokálního traktu na bázi sekvenčního řazení soustav válců a kuželů, který podstatně snižuje úroveň modelů traktu a je vhodný pro rychlé analýzy vlivu různých chirurgických zákroků do vokálního traktu. Tímto způsobem řešená problematika přispívá k rozvoji translační medicíny. Další využití výsledků práce lze hledat u operních pěvců, kterým mohou modely dát návod na zapojení svalů pro dosažení potřebných vlastností hlasu. Dále je vhodné se také zmínit o možnosti rychlého výpočtu frekvenčních charakteristik vokálních traktů v souvislosti se změnou geometrie vokálního traktu. Ještě je třeba zmínit, že výsledky práce mohou být využity při návrhu a konstrukci umělých hlasivek.

Vhodnost použitých metod řešení

Výběr použitých metod řešení disertant samozřejmě odvíjel od vlastních cílů práce. Po stručném popisu základních principů tvorby hlasu je popsán vlastní vokální trakt člověka. Disertant řeší akustiku vokálního traktu mezi hlasivkami a ústy. Použité metody řešení jsou v zásadě dvě. První odpovídá prostorové diskretizaci vokálního traktu sekvencí válcových a kuželových segmentů spojených okrajovými podmínkami (metoda přenosových matic) a jejich 1D analytické řešení. Druhý použitý model využívá optimalizovanou síť konečných prvků, kde tato optimalizace (kromě jiného) vychází z nově formulovaného speciálního konečného prvku. Pro vlastní tvarovou optimalizaci fyzikálního modelu vokálního traktu je potom aplikován genetický algoritmus (modul „ga“ Matlabu). Tento optimalizovaný model obsahuje uzly pouze na vnějším povrchu vokálního traktu a ve středu jeho průřezů. Oba modely výrazně snižují počet stupňů volnosti řešené struktury a umožňují modelovat větvenou strukturu vokálního traktu při zachování přijatelné přesnosti řešení. Modely jsou vzájemně srovnávány a jsou rovněž konfrontovány s klasickým MKP modelem, realizovaným v prostředí ANSYS. Realizace výpočtu na použitých modelech je doplněna vlastními programovými produkty v interpretu Matlab. Použité metody a přístupy k řešení daného problému lze hodnotit kladně, dosažené numerické výsledky jsou vyhodnoceny převážně ve formě grafů či tabulek. Důležité je, že zásadní závěry (kladné i záporné) jsou doplněny vhodným komentářem.

Způsob, jak byly použité metody aplikovány

Vytvořené modely a algoritmy řešení byly aplikovány na testování vlastností vokálního traktu, který odpovídá fonaci hlásky „a“. Základní geometrie traktu byla získána z CT vyšetření probanda. Disertant postupoval standardně od jednodušších modelů k modelům složitějším. Nejdříve byly vytvořeny matematické modely vokálního traktu bez paralelních kavit a po jejich otestování byly vytvořeny kompletní modely vokálního traktu včetně piriformních sinů a valekul. Při řešení byl stále sledován cíl vytvoření vhodného matematického modelu vokálního traktu s malým počtem stupňů volnosti při zachování dostatečné přesnosti výsledků (ve srovnání s klasickými konečnými prvky, např. v systému ANSYS). To se podařilo, neboť analytický model se skládal z 18 segmentů a optimalizovaný MKP model obsahoval 132 nově vyvinutých speciálních prvků. Modely jsou spolehlivě použitelné do frekvenčního spektra 6 kHz a počet stupňů volnosti modelů nepřesáhl číslo 1 000 (řádově menší číslo oproti běžně používaných konečným prvkům). Pro oba výpočetní modely byly vytvořeny vlastní řešiče v interpretu Matlab.

Úroveň znalostí studenta doktorského programu

Předložená disertační práce splňuje náročná kritéria jak po stránce teoretické a odborné, tak i po stránce grafické a stylistického zpracování. Jsem toho názoru, že disertant v práci prokázal svoje hluboké znalosti v oblasti teoretické mechaniky, mechaniky kontinua, aplikované matematiky, ale i v oblasti programování a modelování složitých mechanických soustav v propojení s konkrétními úlohami analýzy vlastností vokálního traktu člověka. Ukázal, že je nejen teoreticky fundovaný, ale že je i schopen svoje teoretické úvahy dovést do konkrétních praktických výsledků. Tyto výsledky analyzuje a ukazuje jejich dopad na analýzu chování modelu vokálního traktu člověka. Použité metody a přístupy k řešení daného problému dokazují schopnost disertanta řešit na vysoké úrovni složité teoreticko-aplikační úlohy z různých oblastí mechaniky kontinua.

Formální úroveň práce

Disertační práce je napsána pečlivě, věcně, je srozumitelná a má logickou stavbu. Má poměrně vysokou odbornou úroveň a velmi pěknou grafickou úpravu s malým počtem

přepisů. Celkový příznivý dojem z práce malinko ruší anglické popisy některých obrázků (např. obr. 2.13, str. 21, obr. 6.12, str. 98 atd.). Některé formulace by možná také bylo možno více precizovat (např. nepoužívat sloveso „spočítat“; věta nad vztahem (2.87), str. 44, je nepřesná; věta nad vztahem (2.95), str. 45, je chybně formulovaná; str. 78 má být „Newtonova-Cotesova metoda“; str. 79, má být η_i jsou souřadnice integračních bodů; str. 101, „frekvenční rok“, 9. řádek shora; str. 67, soustava 3 „přeurčených“ souřadnic; str. 42, bázová a tvarová funkce není totéž). Pokud bych mohl něco doporučit, tak snad vhodněji používat interpunkční znaménka.

Nyní si dovoluji ještě položit disertantovi několik otázek jako úvod do diskuse při vlastní obhajobě disertační práce.

- 1) Jak byly nastaveny počáteční parametry genetických algoritmů a omezení pro optimalizační parametry?
- 2) Proč se disertant soustředil „zrovna“ na samohlásku „a“?
- 3) Proč byla použita Gaussova integrační schémata 7. řádu přesnosti (79)?
- 4) Prosim o vysvětlení pojmu slabá formulace problému (str. 42)?

Závěr

Doktorská disertační práce splnila všechny formulované a stanovené cíle. Práce má velmi dobrou vědeckou úroveň s konkrétními teoretickými i praktickými přínosy. Je napsána pečlivě, má vysokou grafickou úpravu a je též východiskem pro další výzkum v oblasti modelování vokálních traktů člověka.

Disertační práci doporučuji k obhajobě. Za předpokladu její úspěšné obhajoby doporučuji, aby panu Ing. Jaroslavu Štorkánovi byl udělen akademicko-vědecký titul „doktor“ v oboru Mechanika tuhých a poddajných těles a prostředí.

V Plzni dne 21. července 2023

Prof. Ing. Jiří Křen, CSc.