



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií ■

Numerické modelování interakce proudění a pružného tělesa v lidském vokálním traktu

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Šidlof, Ph.D.

Bc. Petra Tisovská

| 22. května 2018 |



Cíle práce

1 Teoretická část:

- Problematika proudění v lidské dýchací soustavě a vokálním traktu
- Řešení dynamiky mechanických soustav se soustředěnými parametry
- Numerické metody pro řešení nestlačitelného proudění vazkých tekutin

2 Vybrané pokročilejší koncepty práce s knihovnou OpenFOAM, včetně jednoduchých modifikací kódů v C++

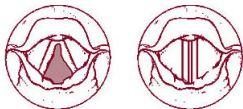
3 Realizace numerické simulace obtékání modelu kmitajícího tělesa:

- Test funkce modelů ve 2D
- Spuštění funkčního modelu ve 3D
- Paralelní výpočet 3D modelu na výpočetním clusteru

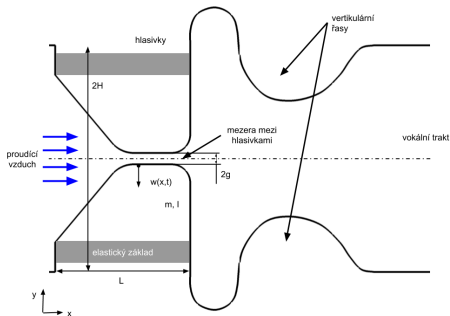


Popis hlasivek

- Zúžená část hrtanu
- Párový hlasivkový sval je tvořený elastickou chrupavkou.
- Hlas vzniká díky svalům, které uvedou hlasivky do fonační pozice a proudu vzduchu, který rozvibruje hlasivkové řasy.

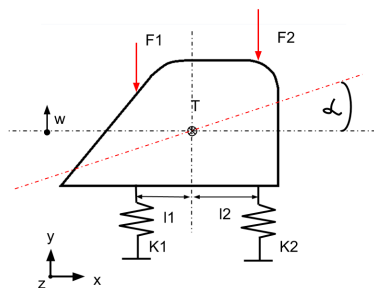


Obrázek: Hlasivky v respiračním a fonačním postavení



Obrázek: Zjednodušené schéma řezu vokálním traktem zobrazující tvar hlasivky

Matematický popis dynamického pohybu hlasivky



Obrázek: Oscilující část hlasivky

$$M\ddot{\mathbf{w}} + B\dot{\mathbf{w}} + K\mathbf{w} = \mathbf{F}, \quad (1)$$

$$B = \varepsilon_1 M + \varepsilon_2 K, \quad (2)$$

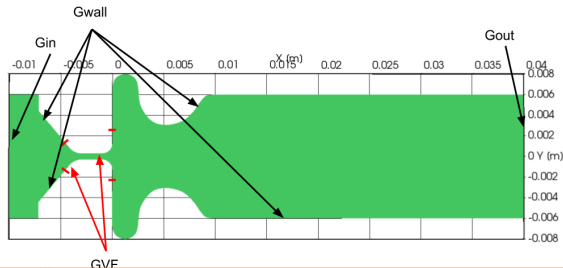
Tabulka: Vlastní frekvence a pološírky rezonanční křivky pro organickou tkáň hlasivek (Horáček, 2002)

Veličina	Značka	Hodnota [Hz]
Vlastní frekvence	f_1	100
	f_2	160
Pološířka rezonanční křivky	Δf_1	23
	Δf_2	29

Metoda konečných objemů pro řešení nestlačitelného proudění vazkých tekutin

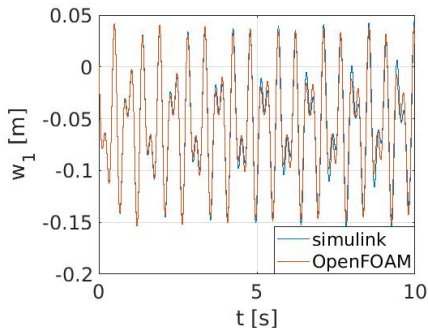
Postup při získávání řešení pomocí MKO:

- 1 Rozdělení oblasti na kontrolní objemy, neboli vytvoření sítě.
- 2 Integrace Navier-Stokesových rovnic přes kontrolní objem.
- 3 Převedení objemových integrálů s divergencí na plošné.
- 4 Aproximace plošných integrálů pomocí numerických toků.
- 5 Převedení na soustavu lineárních rovnic a její numerické řešení.

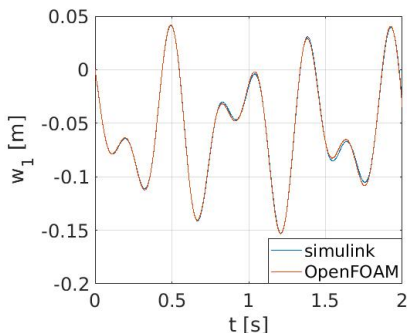


Obrázek: Geometrie oblasti hlasivek a označení hranic

Ověření řešiče pro dynamiku tuhých těles v OpenFOAM



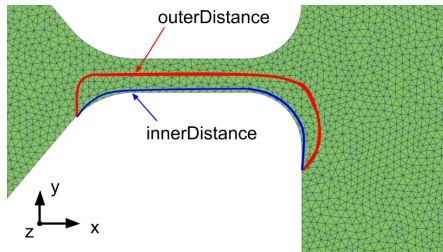
Obrázek: Průběh výchylky ukotvení pružiny K_1



Obrázek: Detail průběhu výchylky ukotvení pružiny K_1

Deformace sítě

- Specifická geometrie
 - Štěrbina
- outerDistance
 - hranice deformační zóny
 - 0,5 mm
- innerDistance
 - Nehybného okolí
 - 0,005 mm

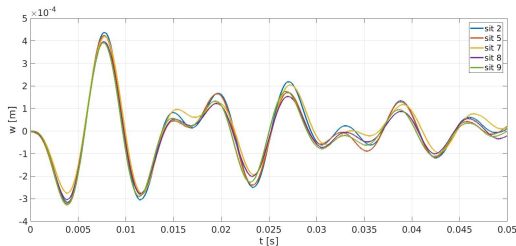


Obrázek: Vyznačená outer distance pro pohybující se hlasivku

Analýza vlivu počtu elementů sítě na výpočet kmitů

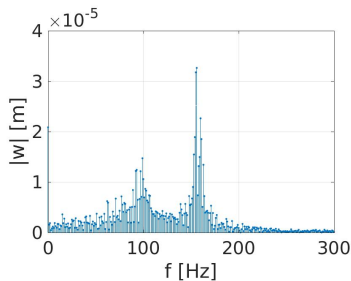
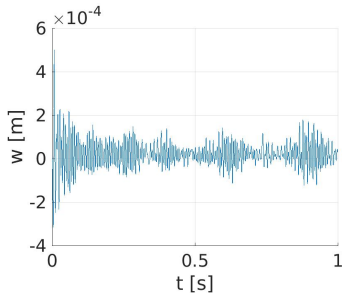
Tabulka: Počet elementů sítí

Označení sítě	Počet elementů
Sít č. 5	3 050
Sít č. 7	30 638
Sít č. 2	60 836
Sít č. 8	121 874
Sít č. 9	242 792



Obrázek: Výchylka těžiště w při vstupní rychlosti $u_x = 1$ m/s pro sítě s různým počtem elementů

Hranice aeroelastické nestability systému – 2D model



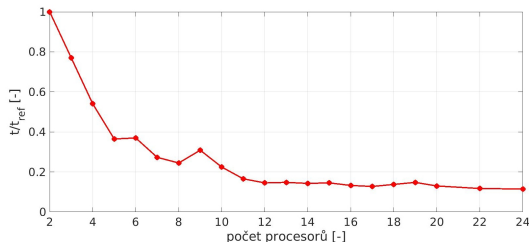
(a) Průběh výchylky těžiště w (b) Spektrum výchylky těžiště w

Obrázek: Vývoj kmitů hlasivky s rychlostí na vstupu $u_x = 1,4$ m/s a počátečním nakloněním $\alpha_0 = 5^\circ$ a k nim příslušná spektra

Paralelizace numerické simulace

Charon:

- CPU: 2x 10-core Intel Xeon Silver 4114 CPU (2.2GHz)
- RAM: 12x 8 GB DDR4 2400 ECC Reg dual rank
- disk: 1x SSD 480 GB DC S3610 Series
- net: 1 GB ethernet a Omni-Path (InfiniBand od Intelu)

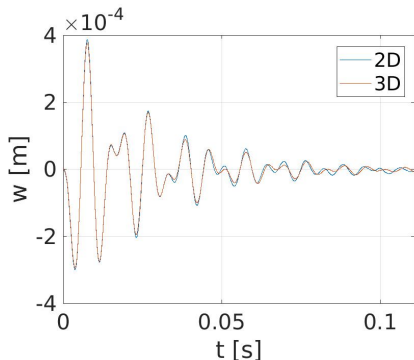


Obrázek: Vliv počtu procesorů na čas numerické simulace

Srovnání 2D a 3D simulace

2D:

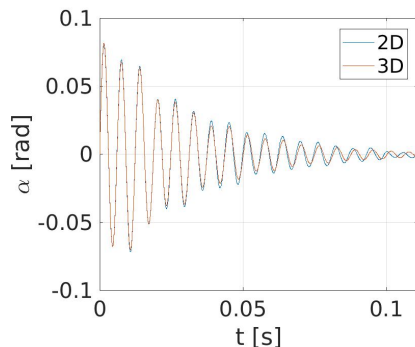
■ 60 386 elementů



Obrázek: Průběh výchylky těžiště w

3D:

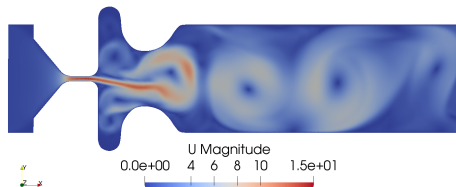
■ 2 433 440 elementů



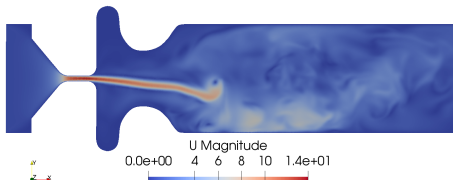
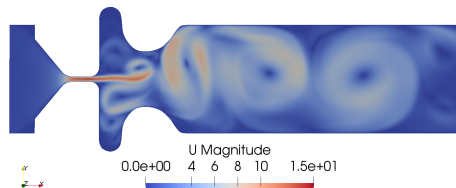
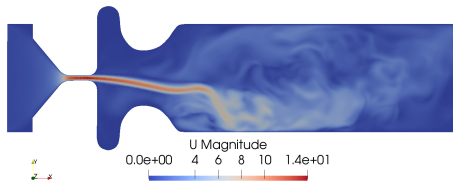
Obrázek: Průběh náklonu hlasivky α

Srovnání 2D a 3D simulace

2D:



3D:



Obrázek: Rychlostní pole v čase $t = 0,7$ s a $t = 0,75$ s





Děkuji za pozornost.



Matice hmotnosti \mathbb{M} , tlumení \mathbb{B} a tuhosti \mathbb{K}

$$\mathbb{M}\ddot{\mathbf{w}} + \mathbb{B}\dot{\mathbf{w}} + \mathbb{K}\mathbf{w} = 0 \quad (3)$$

$$\mathbb{M} = \begin{pmatrix} m & 0 \\ 0 & I \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbb{K} = \begin{pmatrix} K_1 + K_2 & -K_1 \cdot l_1 + K_2 \cdot l_2 \\ -K_1 \cdot l_1 + K_2 \cdot l_2 & K_1 \cdot l_1^2 + K_2 \cdot l_2^2 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbb{B} = \varepsilon_1 \mathbb{M} + \varepsilon_2 \mathbb{K}, \quad (6)$$

$$\varepsilon_1 = 2\pi \cdot \frac{\Delta f_1 f_2^2 - \Delta f_2 f_1^2}{f_2^2 - f_1^2} \quad (7)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\Delta f_1 - \Delta f_2}{f_1^2 - f_2^2}. \quad (8)$$

Výpočet konstant matice tuhosti \mathbb{K}

V případě pohybové rovnice bez tlumení je očekáváno harmonické řešení ve tvaru:

$$\mathbf{w}(t) = \mathbf{W}e^{jst}, \quad (9)$$

kde j je imaginární konstanta a s nabývá hodnot $s = \omega_1$ nebo $s = \omega_2$. Po dosazení řešení do rovnice má soustava tvar

$$\mathbb{M}\ddot{\mathbf{w}} + \mathbb{K}\mathbf{w} = (\mathbb{K} - \mathbf{s}^2\mathbb{M})\mathbf{w} = \mathbf{0}. \quad (10)$$

Rovnice má netriviální řešení, pokud je splněna podmínka

$$\det(\mathbb{K} - \mathbf{s}^2\mathbb{M}) = 0. \quad (11)$$

$$\det \begin{pmatrix} -m \cdot \omega_1 + K_1 + K_2 & -K_1 \cdot l_1 + K_2 \cdot l_2 \\ -K_1 \cdot l_1 + K_2 \cdot l_2 & K_1 \cdot l_1^2 + K_2 \cdot l_2^2 - I \cdot \omega_2 \end{pmatrix} = 0. \quad (12)$$

Výsledná hodnota tuhostí je : $K_1 = 140,69 \text{ N/m}$ a
 $K_2 = 55,07 \text{ N/m}$.



Amdahlův zákon

$$S(n) = \frac{1}{(1 - P) + \frac{P}{n}} \quad (13)$$

S je zrychlení, n je počet procesorů a P je paralelizovatelná část programu

