

ŘEŠENÍ TURBULENTNÍHO VAZKÉHO PROUDĚNÍ S ČÁSTICEMI METODOU LARGE EDDY SIMULATION

Ing. Jaroslav Volavý

Školitel: prof. Ing. Miroslav Jícha, CSc.

VUT v Brně
Fakulta strojního inženýrství
Energetický ústav
Odbor termomechaniky a techniky prostředí

18. leden 2011

Obsah

- 1 Cíle disertační práce
- 2 Large Eddy Simulation
 - Hlavní idea
 - Disperzní fáze
 - OpenFOAM
- 3 Závěr
 - Dosavadní výsledky
 - Námět k diskuzi

Cíle disertační práce

Simulace dvoufázového proudění (tekutina + disperzní fáze) a studie interakce tekutina-částice.

Do disertační práce bude zahrnuto:

- Buzení turbulence pomocí Ornstein-Uhlenbeckova procesu
- Zahrnutí anizotropie turbulence do pohybu částic
- Modulace turbulence částicemi

Cíle disertační práce

Částice unášené vzduchem



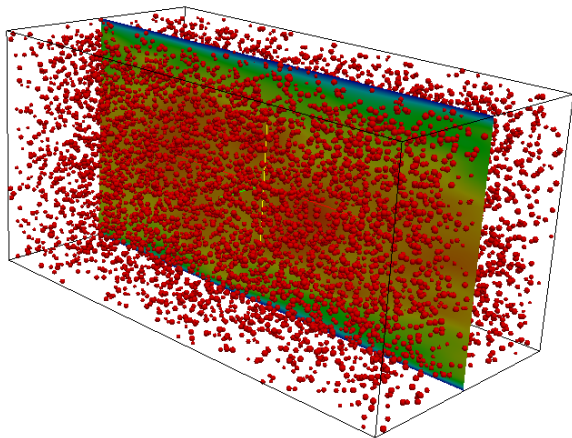
Cíle disertační práce

Částice unášené vzduchem



Cíle disertační práce

Proudění částic kanálem



Simulování turbulence

Direct Numerical Simulation

Metoda DNS

rozřešení turbulence až do nejmenších měřítek

Výhody

- nejpřesnější ze všech metod
- není třeba žádných modelů

Nevýhody

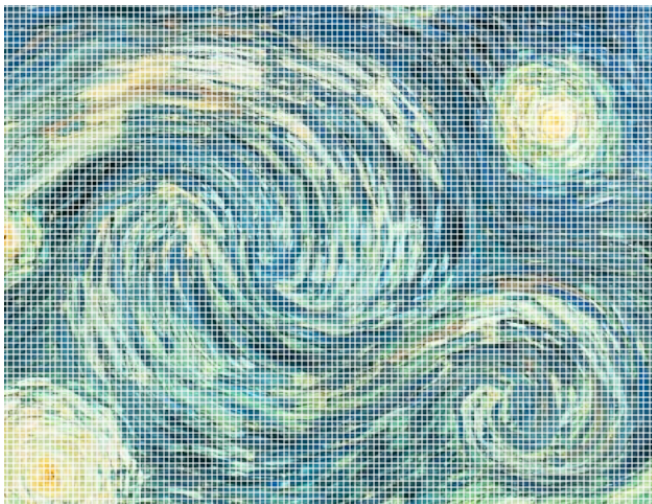
- neskutečně náročná (náročnost $\sim Re^3$)

Turbulence



Direct Numerical Simulation

Výpočetní síť



Large Eddy Simulation

Large Eddy Simulation

- Snížení výpočetních nákladů vs. DNS
- Separace měřítek
- Filtrace Navier-Stokesových rovnic

Filtrace

$$\bar{\mathbf{u}}(\mathbf{x}) = G * \mathbf{u}(\mathbf{x})$$

Dekompozice rychlosti

$$\mathbf{u} = \bar{\mathbf{u}} + \mathbf{u}'$$

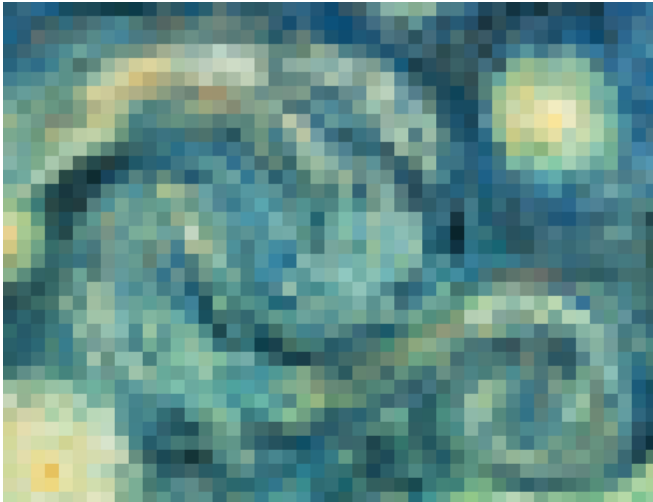
Large Eddy Simulation

Filtrace a síť



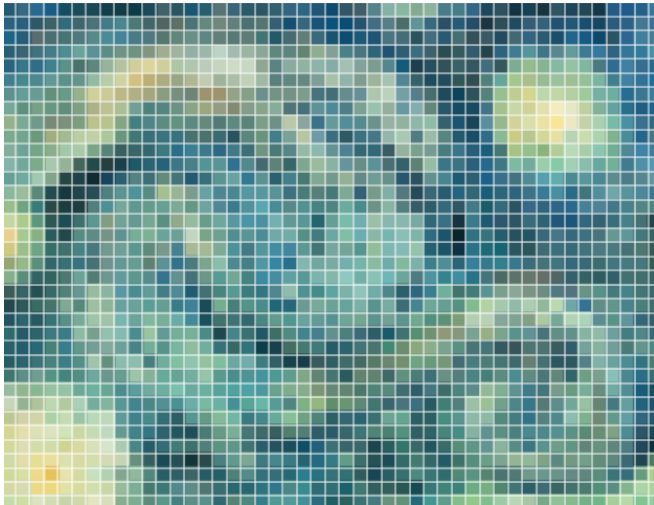
Large Eddy Simulation

Filtrace a síť



Large Eddy Simulation

Filtrace a síť



Filtrované Navier-Stokesovy rovnice

Filtrace

$$\bar{\mathbf{u}}(\mathbf{x}) = \mathbf{G} * \mathbf{u}(\mathbf{x})$$

Filtrované Navier-Stokesovy rovnice

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_k \partial x_k} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}$$

Subgridní napětí

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j$$

Disperzní fáze/částice

Možnosti popisu pohybu

- Eulerův přístup
- Lagrangeův přístup

Lagrangeův přístup

- částice považovány za hmotné body
- pohyb popsán pohybovými rovnicemi

Lagrangeovy pohybové rovnice

$$\text{zrychlení částice} = \begin{aligned} & \text{odpor prostředí} \\ & + \text{gravitace} \\ & + \text{Magnus} \\ & + \text{Saffman} \\ & + \text{Basset} \\ & + \dots \end{aligned}$$

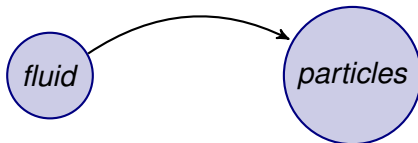
Lagrangeovy pohybové rovnice

$$\text{zrychlení částice} = \begin{aligned} & \text{odpor prostředí} \\ & + \text{gravitace} \\ & + \text{Magnus} \\ & + \text{Saffman} \\ & + \text{Basset} \\ & + \dots \end{aligned}$$

Interakce kapalina-částice

Interakce kapalina-částice

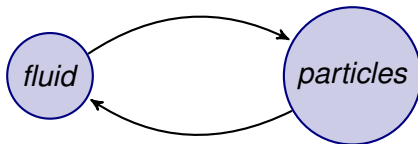
- **One-way coupling**



Interakce kapalina-částice

Interakce kapalina-částice

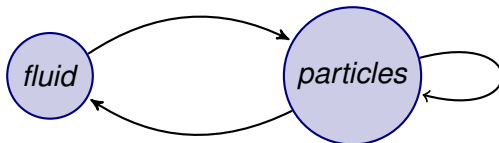
- **Two-way coupling**



Interakce kapalina-částice

Interakce kapalina-částice

- **Four-way coupling**



OpenFOAM

Rovnice

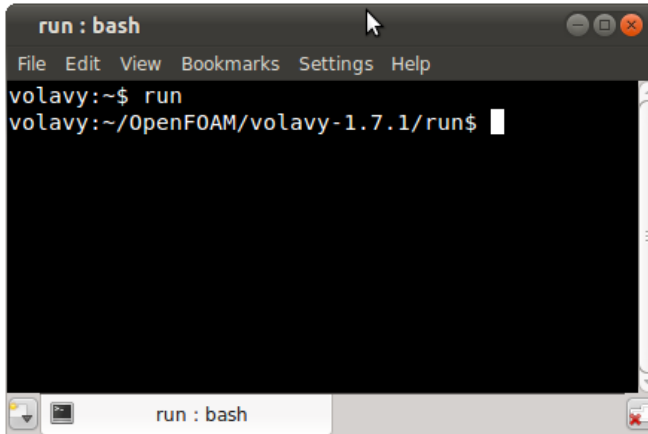
$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot \phi U - \nabla \cdot \mu \nabla U = -\nabla p$$

Zápis v OpenFOAMu

```
solve  
(  
    fvm::ddt(rho, U)  
    + fvm::div(phi, U)  
    - fvm::laplacian(mu, U)  
    ==  
    - fvc::grad(p)  
);
```

OpenFOAM

Prostředí OpenFOAMu

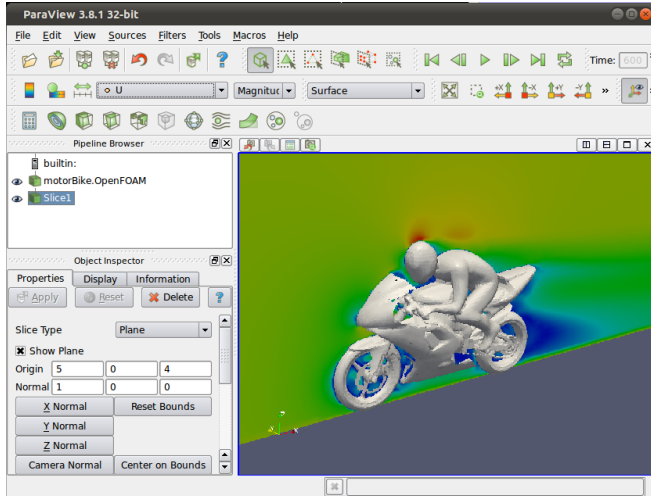


The image shows a terminal window titled "run : bash". The window has a menu bar with "File", "Edit", "View", "Bookmarks", "Settings", and "Help". The terminal content shows the user "volavy" at the prompt "~\$" typing "run", which changes the prompt to "~/OpenFOAM/volavy-1.7.1/run\$". The window has standard Linux window controls (minimize, maximize, close) and a taskbar at the bottom with a tab labeled "run : bash".

```
run : bash
File Edit View Bookmarks Settings Help
volavy:~$ run
volavy:~/OpenFOAM/volavy-1.7.1/run$
```

OpenFOAM postprocessing

Prostředí paraview



Shrnutí

Hlavní cíl disertační práce:

Simulace dvoufázového proudění (plyn + částice)
s uvažováním různých vlivů

Plán dalších prací

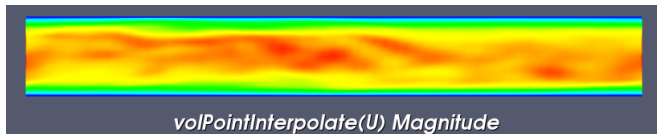
- Zahrnutí modulace turbulence částicemi do sgs modelu
- Implementace do kódu OpenFOAMu
- Validace modelu pro různé geometrie a částice

Dosavadní výsledky práce

Schéma buzení turbulence

Navrženo schéma buzení turbulence

- Generace budící síly v bodech oblasti
- Síla přidána do NS rovnic
- Síla generována pomocí OU procesu



Dosavadní výsledky práce

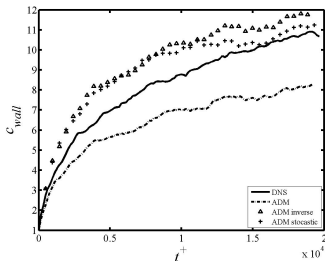
Zahrnutí anizotropie turbulence do pohybu částic

Pohybová rovnice částice

$$\frac{d\mathbf{v}_j}{dt} = \frac{\mathbf{u}(\mathbf{x}_j, t) - \mathbf{v}_j}{\tau_p} \left(1 + 0.15 \text{Re}_p^{0.687}\right)$$

Rychlost v pozici částice

$$u_i = \bar{u}_i + X \sqrt{u_i^2 - \bar{u}_i^2}$$



Dosavadní výsledky práce

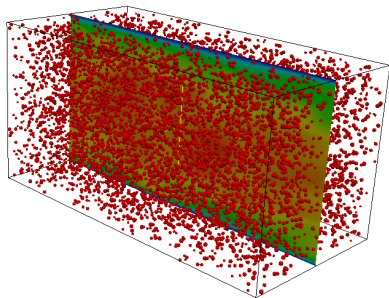
Modulace turbulence částicemi

Zprovozněn two-way coupling

- do NS rovnic přidána síla od částic

Úkol: zahrnout vliv částic do subgridního modelu

- např. Smagorinského model: $C_S = C_S(\phi_p)$



Databáze benchmarků

Nevíte o nějaké databázi benchmarků pro dvoufázové proudění?

Síť pro zpětný proud za schodem

