

粒子法による流れ場の形状最適化における GPU を用いた計算の高速化に関する研究

351204377 吉川 康宏

論文要旨

粒子法を流れ場の形状最適化問題に適用することが試みられている。三ヶ田は、MPS (moving particle semi-implicit) 法を用いることにより形状最適化問題が解けることを示した。一方、近年では GPU (Graphics Processing Unit) の優れた並列演算性能が注目され、科学技術計算にも利用されるようになってきた。そこで、本研究では MPS 法による流れ場の形状最適化解析を GPU を用いて行うプログラムを作成し、CPU のみを用いて解析した場合との性能比較を行った。

本研究では、形状最適化問題を次のように定義した。 $[0, t_T] \times \mathbb{R}^2$ を時間と流れ場の領域とする。 $\Omega_0 \subset \mathbb{R}^2$ を初期領域、 \mathbf{i} を恒等写像を表すことにして、領域変動 $\phi: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ を設計変数にして、領域を $\Omega(\phi) = \{(\mathbf{i} + \phi)(\mathbf{x}) \mid \mathbf{x} \in \Omega_0\}$ のように動かすことにする。 $(\mathbf{u}, p): [0, t_T] \times \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^3$ を $\Omega(\phi)$ のときの非圧縮性流体の非定常 Navier-Stokes 問題の解で流速と圧力とする。本研究では、次のような形状最適化問題を解析した。

損失エネルギー最小化問題 ある $t_S \in [0, t_T]$ を選び、 $f_0(\phi, \mathbf{u}, p)$ を $[t_S, t_T]$ における損失エネルギー、 $f_1(\phi)$ を領域 $\Omega(\phi)$ の大きさ制約に対する評価関数とする。このとき、

$$\min_{\phi} \{f_0(\phi, \mathbf{u}, p) \mid f_1(\phi) \leq 0, \text{非定常 Navier-Stokes 問題}\}$$

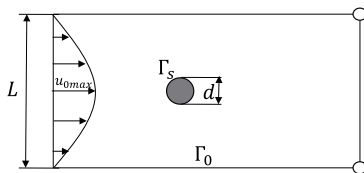
を満たす $\Omega(\phi)$ を求めよ。

非定常 Navier-Stokes 問題は MPS 法により次の手順で解析される。(1) 圧力勾配項を除いた Navier-Stokes 方程式から仮の流速を計算する。(2) 連続の式から構成される Poisson 方程式から圧力を計算する。(3) 圧力から仮の流速と粒子位置を更新する。

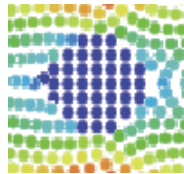
本研究では、(2) において GPU を用いた並列計算の実装を行った。実装には nVIDIA 社が提供するライブラリを使用することで並列計算を実現した。

本研究により、次の結果を得た。

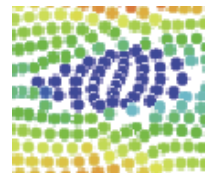
- (1) GPU を用いて非定常 Navier-Stokes 流れ場の形状最適化問題を解くプログラムを開発した。
- (2) CPU のみの場合と CPU と GPU を併用した場合を比較すると、粒子数 3,600 程度の障害物問題に対しては CPU のみの場合の方が計算時間は短かった。GPU を用いた場合には、データの転送時間を必要とするが、並列計算では計算時間の短縮が期待される。粒子数を増加させたときの性能比較は今後の課題として残された。



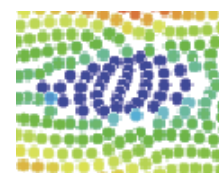
障害物問題



初期形状



最適形状 (CPU)



最適形状 (CPU+GPU)