

マルチプロセッサシステム上での CFD の並列処理に関する研究

5 F - 8

柳川 慎, 橋本 茂, 前川 仁孝, 岡本 雅巳, 笠原 博徳
早稲田大学理工学部電気電子情報工学科

1 はじめに

近年、スーパーコンピュータの処理能力向上に伴い、大規模数値シミュレーション、特に CFD (Computational Fluid Dynamics) は大いに発展し、以前よりも複雑な現象の解析も可能となってきたが、LES のような更に複雑かつ大規模な計算が要求されるようになり、並列処理による高速化が求められている [1][2] [3][4]。

本稿では、航空宇宙技術研究所において数値風洞の開発の際に性能評価の対象とした CFD プログラム「NS3D」を主メモリ共有型マルチプロセッサシステム上で性能評価を行った結果と、CFD プログラムの粗粒度、近細粒度の並列性について述べる。

2 CFD プログラムの特徴

CFD プログラムは、乱流モデルを付加しないナビエ・ストークス方程式の数値解を TVD スキームと IAF 法により求めるプログラムである。

プログラムの構成を図 1 に示す。メイン部分は前処理部 (初期化部)、時間発展ループ部、後処理部から成りたっている。時間発展ループ部からは、サブルーチン SUB1~SUB6 が呼ばれている。SUB1,2,3 と SUB4,5,6 は計算の方向がそれぞれ I,J,K 方向と異なるだけで、ほぼ同じ処理をしている。各部分のステップ数は、メイン部分が 190 ステップ、SUB1~SUB3 が各 480 ステップ、SUB4~SUB6 が各 930 ステップ、全体では 4420 ステップとなる。使用する配列は、要素数 $131 \times 131 \times 41$ の 3 次元配列が 20 個、 129×129 の 2 次元配列が 25 個、129 の 1 次元配列が 93 個ある。

各サブルーチンは、表 1 に示すように全て I,J,K をループ制御変数とする 3 重の DO ループで構成されている。3 重ループの最内ループ、最外ループに関してはイタレーション間に依存がないが、中ル

プに関しては前ループでの値を参照するループキャリドディペンデンスがある。

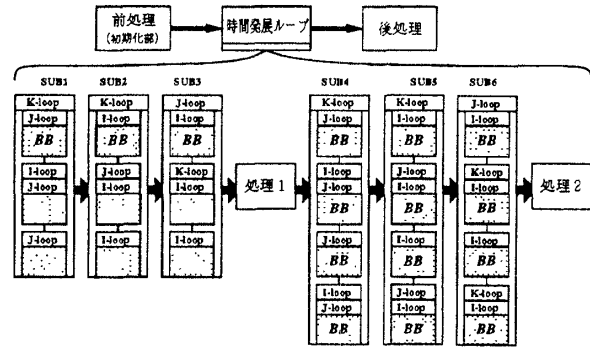


図 1: NALTEST の構造

3 CFD プログラムの並列化

CFD プログラムの前処理部、後処理部は処理コストが小さい上、全て Doall ループなので、そのままループ並列化 (中粒度並列処理 [6]) できる。処理時間の大半を占める時間発展ループ部は、各サブルーチン内の変数をスカラエクспанション、アレイクスパンションをすることで最外ループに関して Doall になり、また、処理 1,2 は Doall あるいはリダクションループなので、それぞれ中粒度並列処理が可能になる。つまり、SUB1,2,4,5 の処理時には各プロセッサ (PE) は (I,J) 平面を、SUB3,6 の処理時には (I,K) 平面を担当することになる。

4 Ultra Enterprise 3000 での実行

本章では CFD プログラムを並列化し、サン・マイクロシステムズ社の Ultra™ Enterprise™ 3000 上で実行した結果について述べる。

4.1 Ultra Enterprise 3000 のアーキテクチャ

今回実行に用いたマルチプロセッサシステム Ultra™ Enterprise™ 3000 は、2 台の UltraSPARC(167MHz) と 128MB のメモリを積んだボードが 3 枚実装されている。メモリには全て等距離にアクセスできるため、6 台の PE と 384MB の共有メモリが 1 本のバスで接続されている、主メモリ共有型マルチプロセッサシステムである。また、使用した OS は

Parallelization of CFD on Multiprocessor systems
Makoto YANAGAWA, Shigeru HASHIMOTO, Yoshitaka MAEKAWA, Masarni OKAMOTO, Hironori KASAHARA
Dept. of Electrical, Electronics and Computer Engineering,
School of Science, Waseda University

Solaris™2.5.1である。

4.2 実行結果

CFDプログラムの配列サイズを65×65×20、つまり1/8にし、時間ループの回転数を10として実行した。使用PE数に対する実行時間を図2に示す。図中の「チューニングなし」は、SUNのループ並列化コンパイラで自動並列化を試みた場合で、「チューニングあり」は各サブルーチンを全てインライン展開し、スカラ変数、配列変数はスカラエクspansion、アレイエクspansionなどのチューニングをして実行した場合である。その結果、「チューニングあり」、PE数6台の場合に、「チューニングなし」に比べ125%の速度向上が得られた。

PE数	1	2	3	4	5	6
チューニングなし [ms]	127.4	74.60	64.08	60.79	57.05	54.22
対1PE比	1.00	1.70	1.99	2.10	2.23	2.35
チューニングあり [ms]	127.4	64.54	43.62	37.01	35.65	24.11
対1PE比	1.00	1.97	2.92	3.44	3.57	5.28
対チューニングなし比	1.00	1.16	1.47	1.64	1.60	2.25

図2: CFDプログラム(1/8サイズ)の実行結果

5 CFDプログラムにおける粗粒度、近細粒度の並列性

CFDプログラムのサブルーチンSUB1, SUB4を切り出し、本研究室で実装されているOSCAR[6]マルチグレイコンパイラによるマクロデータフロー解析から得たマクロタスクグラフを図3,4に示す。なお、図中のBB, DOALL, SEQ, REDはそれぞれ、BasicBlock, Doallループ, Sequentialループ, Reduction付きDoallループを表している。また、マルチプロセッサシステムOSCARシミュレータ上で近細粒度並列処理した時の実行時間を表1,2に示す。PE数を5台以上にしても飽和しているため、近細粒度の並列性は2~3だということが分かる。

表1: SUB1の実行時間

PE数	1	2	3	4	5
実行時間 [ms]	0.6974	0.4962	0.3915	0.3307	0.3056
速度比	1.00	1.41	1.78	2.11	2.28

表2: SUB4の実行時間

PE数	1	2	3	4	5
実行時間 [ms]	1.435	0.9769	0.7972	0.6331	0.5130
速度比	1.00	1.47	1.92	2.27	2.80

3章で述べたようにサブルーチンSUB1~6は全てDoallループなので、使用するPE台数でループ分割したものを1つのマクロタスクとして粗粒度並列処理をし、更にマクロタスクの内部を近細粒度並列処理をする、階層型マクロデータフロー処理をす

ることで実行時間が一層短縮されると考えられる。

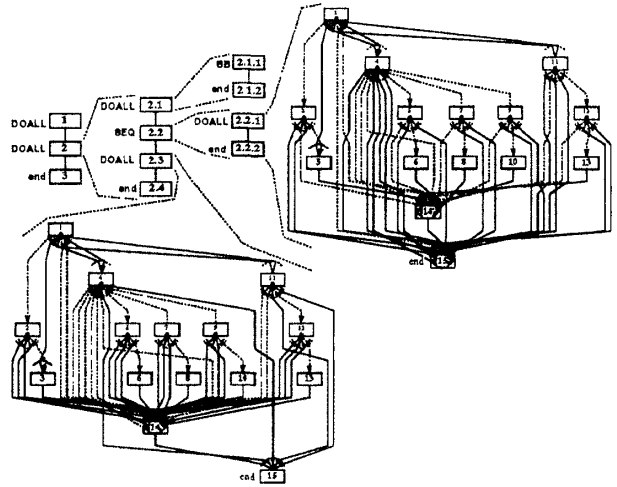


図3: SUB1のマクロタスクグラフ

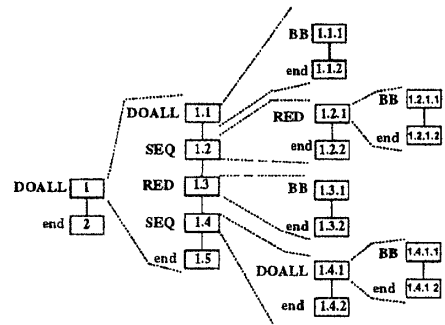


図4: SUB4のマクロタスクグラフ

6 まとめ

本稿では、CFDプログラムをUltra™ Enterprise™ 3000上でループ並列化し実行した結果について述べた。また、CFDプログラムの粗粒度、近細粒度並列性の抽出による速度向上について述べた。

最後に、CFDプログラムNS3Dを御提供戴いた航空宇宙技術研究所の皆様に感謝いたします。

参考文献

- [1] 中村孝, 吉田正広, 福田正大, 中村修一, 村瀬丈夫, 松崎達哉: “NWT 並列 FORTRAN に基づく並列評価”, 第10回航空機計算空気力学シンポジウム論文集, 1992
- [2] 中村孝, 吉田正広, 福田正大, 村瀬丈夫, 松崎達哉: “CFDプログラムによるNWTの性能評価”, 第11回航空機計算空気力学シンポジウム論文集, 1994
- [3] 岡田信, 高村守幸: “CFD向け並列計算機のソフトウェア”, 第8回航空機計算空気力学シンポジウム論文集, 1990
- [4] 田中輝雄, 面田耕一郎: “高並列計算機による空気力学シミュレーション構想”, 第8回航空機計算空気力学シンポジウム論文集, 1990
- [5] 保原 充, 大宮司 久明: “数値流体力学”, 東京大学出版, 1992
- [6] 笠原 博徳: “並列処理技術”, コロナ社, 1991