

Cell B.E. クラスタを用いた格子ガスオートマトンの実装*

新井佑介† 澤井涼‡ 山口佳樹§ 丸山勉¶ 安永守利||

筑波大学大学院システム情報工学研究科**

1 はじめに

Cell Broadband Engine(以下, CBE) は, 高解像度の動画やマルチチャネルの音声のリアルタイム処理, またマルチメディア系の処理や分散コンピューティング環境を想定し設計されたマルチコアプロセッサである[1]. 動作周波数を3.2GHzとしたときのピーク性能は, 単精度浮動小数点数演算で204.8GFlops, 倍精度では14.6GFlopsである. 本研究では, 流体シミュレーションなどに応用される格子ガスオートマトンを実装し, また複数のCBEを用いたクラスタの実装についての検討を行った.

2 Cell Broadband Engine (CBE)

CBEは, 1つのPowerPC Processor Element(以下, PPE)と8つのSynergistic Processor Element(以下, SPE)から構成されるマルチコアプロセッサである. PPEは汎用プロセッサであり, CBE全体の制御を行う. OSもPPE上で動作する. 一方, SPEは高速演算に特化されたプロセッサコアで, システム制御命令を持っていないが128ビットのSIMD演算が可能といった特徴を持っている. CBEとSPEの構成を図1に示す.

3 格子ガスオートマトン法

格子ガスオートマトンとは, セラオートマトン[2]を流体解析に適用しようとしたものであり, 流体を粒子の集まりとして捉え, 時間・空間・および速度について完全に離散化して取り扱うモデルである(図2). 1973年に提案されたHPPモデル[3](図2(左))は, 格子の回転対称性が不十分であったため, 流体の挙動を正確にシミュレートできなかった. そこで, Frisch等によって提案されたFHPモデル[4]が二次元非圧縮性流れの解析に用いられるようになった(図2(右)). 以上から, 本研究でも実装対象はFHPモデルとした.

FHPモデルについて考えると, ある一つの格子 x (図2(右)の影がついている部分). FHPモデルでは六角形には, 六方向の速度を持つ粒子(図2(右)の1~6の数字)と格子内で静止している粒子(図2(右)の0の数字)の計七個が存在できる. 移動方向を i とし速度を c_i と

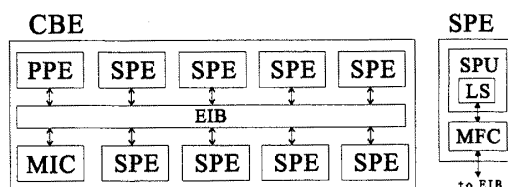


図1 CBE(左)とSPE(右)の構成 [1]

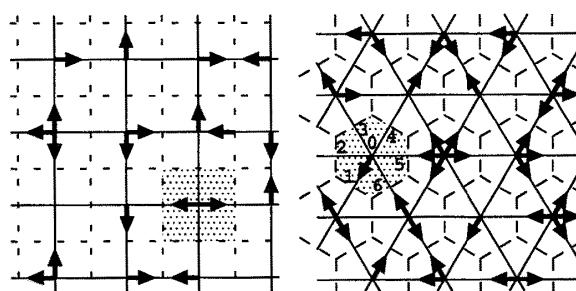


図2 格子構造, HPPモデル(左)とFHPモデル(右)

すると, $c_i(i=1\sim6)$ は以下の式で表される.

$$c_i = \left(\cos \frac{(5-i)\pi}{3}, \sin \frac{(5-i)\pi}{3} \right) \quad (1)$$

また, 上記 c_i を用いて, ある時刻 t における格子 x の状態 $(n_i(x, t))$ は以下の様に表せる.

$$n_i(x + c_i, t + 1) = n_i(x, t) + \Delta_i(n) \quad (2)$$

この時, $\Delta_i(n)$ は衝突による $n_i(x, t)$ の変化量であり, ± 1 と0の何れかの値を取る関数である.

4 シミュレーション空間の分割

各格子点において必要となる情報は6個の移動粒子と1個の静止粒子の存在の有無であり, 粒子が存在する(1), 存在しない(0)で表現すれば, 各格子点は7bitで表現できる. 本研究では実装の都合上, 各格子点を1byteで表現することにした. ここで, 1つのCBEを用いた場合の分割方法について考える. 本研究で使用するCBEは, 7個ある各SPEの中に256KBのLocal Storeを持っているが合算しても1792KB(=7×256)の記憶領域しか持たないため, 全シミュレーション空間を記憶することができない. そこで本研究では, 各SPEで記憶できる大きさまで領域を論理的に分割して計算することで問題を解決している. 以上のシミュレーション空間分割手法とその分割された空間をどのようにSPEで演算するかの概要を図3に示す. この図において, 分割して得られた正方形の領域は小領域と呼ぶことにする. ま

* Implementation of Lattice Gas Cellular Automata simulator with Cell B.E. cluster

† Yusuke Arai

‡ Ryo sawai

§ Yoshiki Yamaguchi

¶ Tsutomu Maruyama

|| Moritoshi Yasunaga

** University of Tsukuba

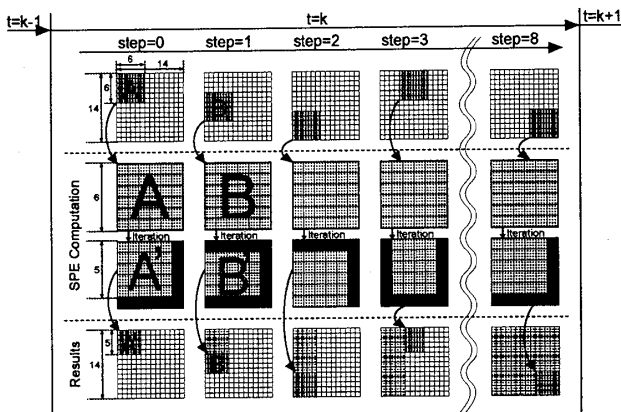


図3 シミュレーション空間の分割と SPE による演算結果の格納

た、全シミュレーション空間は $196(=14 \times 14)$ 格子点とし小領域は $36(=6 \times 6)$ 格子点としている。

次に、図3において小領域を1個のSPEで順に演算していく方法について説明する。図3において、stepは処理の順番を表し、矢印方向(step=0からstep=8の方向)に処理が進んでいく。よって、step=0より演算が開始されstep=8でシミュレーション空間の全格子点の演算が終了し、シミュレーションの単位時間tが1インクリメントされて次の時間のシミュレーションが行われる。

ここで、SPEについて着目すると、step=0の時に全空間左上の小領域がSPEのLocal Storeに読み込まれる。SPEでは読み込まれた小領域(図3のA領域)について演算を行うが、演算量に対するデータ転送を減らすため繰り返し演算(図3のIteration)を行う。このとき、小領域の境界となる格子については、境界を跨いだ隣の格子点の新しい演算結果を得ることができないため、繰り返し演算において正しい結果を得ることができない。このため演算を繰り返しが多くなると、正しい演算結果を返す領域が狭まっていく。図3において、A領域(6×6格子点)に1回の繰り返し演算を適用したため正しい結果を得られた領域がA'領域(5×5格子点)に減少していることがわかる。

SPEでの演算が終了すると、その結果をメモリに格納する。このとき、繰り返し計算により得られた正しい結果のみが格納され、黒く塗りつぶされている領域(境界面にあるため正しく計算できなかった領域)は破棄される。これをこの後、step=1~8まで繰り返し、全演算結果を出すことができる。

5 評価結果

計算時間及び速度向上比について表1に示す。評価実験は、東芝製 Cell Reference Set を用い、シミュレーション空間は約1100万格子、世代数は1280世代という条件の下で行った。また、表1において、timeは1世代あたりの計算時間である。表1より、Core 2 Duoと比較して、CBEにより約3.3倍の速度向上が得られたことがわかる。

6 複数のCBEによるクラスタリング

これまでの結果から、第4章で述べた方法が有効であることを示したが、複数のCBEを用いたクラスタへ拡

表1 CBEによる速度向上率

	Core 2 Duo	CBE
clock(GHz)	2.4	3.2
# of core	2	7
L2 Cache	4MB	7×256KB
DRAM(GB/s)	12.8	25.6
time(msec)	77.3	23.4
sppedup	1.0	3.30

張する際にも同様の方法を用いることが出来ると考えられる。第4章では、複数のSPEによる並列処理を行うために、シミュレーション空間をSPEのLocal Storeの大きさに応じた小領域に分割した。ここで、シミュレーション空間をいくつかのCBE作業領域に分割する場合を考えると、この作業領域1つの大きさをCBEのメインメモリの大きさに応じて決定することで、複数のCBEによる並列処理においても同様の効果が得られると考えられる。

CBEのクラスタを構築するにあたって、著者らは安価なCBE搭載計算機であるPlayStation3(以下、PS3)を採用した。ここで、ボトルネックになると考えられるHDDのアクセス速度およびイーサネットの通信速度から、一度のデータ転送に対して約500世代の繰り返し計算を行うことにより、転送時間を隠蔽できるものと見積もった。

次に、PS3は256MBのメインメモリを搭載しているが、通信を効率的に行うためにダブルバッファリングを行うことを考慮すると、1つのCBEが持てる空間の大きさは、64MB、つまり 8192×8192 格子となる。この空間は非常に大きく、CBEの性能を最大に近い形で利用出来るが、一度のデータ転送に対して500世代の繰り返し計算を必要とするため、計算速度に約25%のロスが生じることがわかっている。

このように、これまでの実装の単純な拡張では問題が生じるため、クラスタ用の新しい手法については、今後の課題である。

7 おわりに

本研究では、格子ガスオートマトン法をCBEに実装する際のシミュレーション空間の分割方法を提案した。また、単体のCBEで実装を行い、提案する手法が有効であることを示した。この結果から提案手法が複数のCBEによるクラスタにおいても応用可能であり、有効だと考えられることを述べた。今後の課題として、複数のCBEを用いたクラスタの実装を行い、プロセッサ数によるスケーラビリティについても評価する予定である。

参考文献

- [1] 東芝レビュー, Vol.61, No.6, pp.9-15, Jun. (2006).
- [2] 加藤恭義, 他: セルオートマトン法, 森北出版株式会社, (1998).
- [3] J. Hardy, et al.: *Molecular dynamics of a classical lattice gas: Transport properties and time correlation functions*, Phys. Rev. A, vol.13 no.5, pp.1949-1961, (1976).
- [4] U. Frish, et al.: *Lattice-gas automata for the Navier-Stokes equation*, Phys. Rev. Letters, vol.56 no.14, pp.1505-1508, (1986).