

高精度線量分布のためのハードウェアによる高速モンテカルロ計算 High-speed Monte Carlo Calculation with Hardware Acceleration for Accurate Dose Distribution

明上山 温†
Atsushi Myojoyama

齋藤 秀敏‡
Hidetoshi Saitoh

1. まえがき

現在の3次元線量分布計算では、ClarksonやConvolution-Superposition法が一般に用いられており、現在のPCでは治療計画ソフトウェアの最適化もあるが、Clarkson法はほぼリアルタイムで、Superposition法でも数秒で3次元線量分布計算を行うことが可能である。一方で不均質物質に対してより高精度の計算が可能であるモンテカルロ法を用いた場合、現状では数十分または数時間を消費する。モンテカルロ法を他のアルゴリズムによる計算結果の検証用として用いる場合、この計算時間のオーダーの違いがボトルネックとなる。十数年前からCPUの浮動小数点SIMD拡張が一般のものにも導入され、それによる計算の高速化が様々な分野で行われている。また、最近になって画像表示や3次元計算を専門に行うビデオカード(GPU: Graphics Processing Unit)内でも単精度浮動小数点ではあるが物理演算を行うことが可能となってきた。そこで、本研究ではモンテカルロ法による線量分布計算をSIMD、GPUを積極的に用いて行った場合の計算時間の短縮について検討したので報告する。

2. 理論

一般にモンテカルロ法の精度の向上には加速器に入射する(光子も含む)粒子の数(ヒストリ)を多くする必要があるが、これにより放射線治療用加速器のシミュレーションでよく知られるモンテカルロコードであるEGS(Electron Gamma Shower)では計算時間が直線的に増加する。一方で国内での研究において、多数の粒子を同時に追跡することが可能な「相関サンプリング法」^[1]や「MVP」^[2]のようなイベントベースの手法も存在する。そこで、本研究ではSIMDおよびビデオカードでより高速化されるイベントベースの手法の開発を、ヒストリベースのモンテカルロ計算であるEGSで検証しながら行う。これにより、安定した新しいコードを生成することが可能である。

3. 方法

- 加速器のモンテカルロ計算の高速化で考慮が必要なのは、
- ・ 計算精度の保証
 - ・ MLC等のシミュレーションが可能であること
 - ・ 人体内の吸収線量を高速に計算可能なこと

である。よって本研究ではモンテカルロ法としてNRCCにより開発されたEGSnrc4を用い、そのアルゴリズム自体の変更は行わないことに注意した。

モンテカルロ計算のC言語またはFORTRANプログラムについてはコンパイラオプションによりSIMDを用いるこ

とが可能であるが、これはコンパイラがソース内の並列処理可能な部分を検出して行うものであり、変数の型や多重ループの条件等によってはSIMDを用いない場合があるため、積極的にハードウェアを利用しているとはいえない。そこで本研究では粒子の座標を表す型を全て単精度浮動小数点型に統一し、粒子の座標演算を高速化することとした。本報告ではCPUとしてPentium 4 3.0 GHzを用いたため上記の手法により並列化された部分においてSIMDは4並列での演算が可能となった。並列部分を手作業でSIMDプログラム化し、SIMDはC言語・FORTRAN両言語に対応させるためアセンブラ表記とした。

GPUプログラムのために用いたハードウェアはNVIDIA製のGeforce 8800GTXであった。SIMDと同様ループを含むルーチンに対してGPUのバーテックス・ピクセルシェーダ言語であるOpenGLのGLSLとCgを用いて別ルーチンとし実装した。今回用いたビデオカードはリアルタイムボリュームレンダリング等でも評価が高いものであり、実際に簡単なボリュームレンダリングプログラムで実測した結果、512×512×451ボクセルのマルチスライスCT画像に対して秒間20枚のRay-casting、Ray-sum、MIPのレンダリングが可能であることが確認された。モンテカルロシミュレーションではGPUプログラムを並列に

本報告ではSIMDを用いた場合、GPUを用いた場合についての実験を行い、精度と計算時間を比較した。

4. 結果

本報告では10MV X線の加速器と、40×40×40 cm³の水ファントムを用い、実測PDD、BEAMnrcMPにより計算されたPDDと本手法によるPDD及びOARを比較した。線量分布計算に用いたDOSXYZnrcについては分散低減を行わずに計算を行った場合の計算時間を示した。ただしコンパイ

表1 実測・シミュレーション条件

	measurement	simulations
material	water	water
SSD	100 cm	100 cm
field size	10×10, 20×20 cm ²	
Kinetic energy of electrons	10 MeV (nominal)	10.48 MeV
history	-----	2 billions
accelerator	Varian Clinac EX21 10MV X-ray	
compared data	PDD and OAR	

† 首都大学東京, Tokyo Metropolitan University

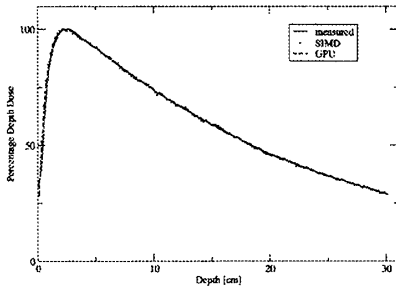


図1 実測と計算のPDDの比較

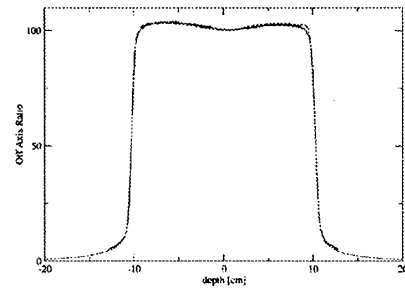


図2 実測とGPUによる計算のOARの比較

ルオプションはSIMDを用いる設定とした。また本実験ではヒストリ数は10億とし、照射野は $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 、 $20 \times 20 \text{ cm}^2$ のみとした。図1に実測とシミュレーションのPDDの比較を、図2にOARの比較を示した。図1、図2より全ての計算結果が実測値の1%以内となっており、座標にfloat型を用いたことによる精度の低減は本実験では確認されなかった。計算時間の比較は図3に示されており、SIMDを用いた方法がコンパイルオプションなしと比べて10倍以上の計算時間の短縮が実現できた。また、GPUを用いた手法では8倍程度の短縮であった。

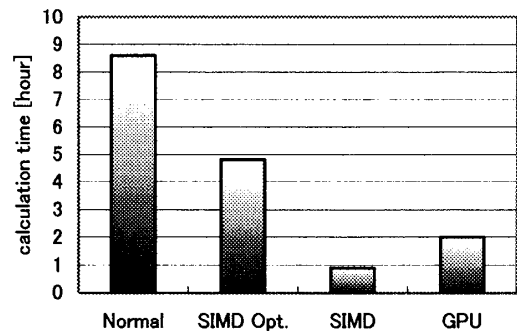


図3 プログラムによる計算時間

5. 考察と検討

結果より、の場合に対して SIMD の計算時間が短縮された理由は、CPU 内蔵の SIMD の積極的利用による並列処理の最適化が有効であったためであると考えられた。また、座標計算に関して全て単精度浮動小数点を用いたことが大きく計算速度向上に繋がったと考えられた。一方で GPU を用いた場合は、予想よりも低い結果であった。これは、まずモンテカルロ計算については座標以外のパラメータも同時に計算されているため、外部バスを用いている GPU では GPU 内で計算を完結することが出来ないため CPU またはメインメモリに結果を返さねばならず、この部分がオーバーヘッドとなったことが考えられた。また、今回作成したプログラムの最適化不足も考えられた。今後は GPU を用いた最適化の手法についてモンテカルロ法のアルゴリズムの理解も含めて考える必要がある。

文献

[1] D.S.Bagheri and D.W.O.Rogers, "Sensitivity of megavoltage photon beam Monte Carlo simulations to electron beam and other parameters," *Med Phys.*, Mar.29(3), pp.379-390, 2002.

[2] LaRiviere PD, "The quality of high-energy X-ray beams," *Brit. J. Rad.*, 62, 473-481, 1989.

[3] Takeshi Hiraoka, "Appendix 14, Stanard Dosimetry of Absorbed Dose in External Beam Radiotherapy: Japan Society of Medical Physics," pp.170-171, Tsusho-Sangyo Kenkyu-Sha, Tokyo, 2002.

[4] D.W.O. Rogers, C.-M.Ma B.Walters et al., "BEAMnrc Users Manual," NRCC Report PIRS-509(A) rev.F, 2001.

[5] C.-M.Ma, D.W.O. Rogers, "BEAMDP Users Manual," NRCC Report PIRS-509(C), 1999.