

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2007～2008

課題番号：19790887

研究課題名（和文） ハードウェアによるモンテカルロ線量分布計算の高速化

研究課題名（英文） High speed Monte Carlo dose calculation using hardware acceleration

研究代表者

明上山 温 (MYOUJOUYAMA ATUSHI)

首都大学東京・人間健康科学研究科・准教授

研究者番号：90347279

研究成果の概要：

本研究では医療用に用いられる直線加速装置を対象とし、モンテカルロ法による3次元線量分布計算をCPUの持つSIMD機能、GPUのプログラム機能を積極的に用いて、計算精度を損なうことなく1PC当たりの計算速度を従来の20倍に高速化するシステムを開発した。本手法により1シミュレーションにかかる時間が8時間から20分程度とすることが可能となった。また、階層型可逆圧縮アルゴリズムをGPU内で行うことにより6台以上の並列計算においてもほぼ直線的に計算速度を向上させることを可能とした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,500,000	0	1,500,000
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,700,000	360,000	3,060,000

研究分野：医科歯学

科研費の分科・細目：内科系臨床医学・放射線科学

キーワード：放射線治療物理学

1. 研究開始当初の背景

現在の3次元線量分布計算では、Clarkson法、Convolution法、Superposition法が一般に用いられるようになり、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。モンテカルロ法による

線量分布計算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。計算アルゴリズムの違いによる線量分布の相違は現状では無視できず、これらを検証するためには更に高精度のモンテカルロ計算が必要であることから、計算精度を維持しつつ高速化する方法の開発が望まれている。一方PCは数年前からCPUの浮動小数点SIMD拡張が一般に導入され、この機能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

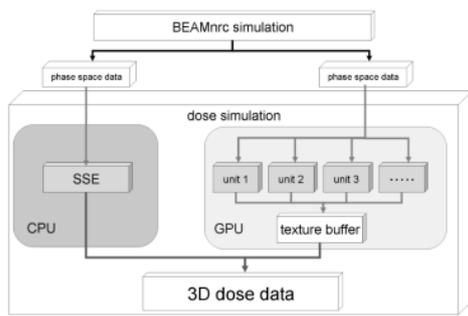


図1 PC内部での並列処理

算を専門に行うビデオカード内でも単精度浮動小数点でのプログラミングによる物理演算を行うことが可能となった。これらハードウェアによりモンテカルロ計算が実現すると、数十倍の高速化が期待できる。また、コンピュータ1台当たりの高速化により並列化した場合の性能が画期的に上がることになる。

2. 研究の目的

本研究ではモンテカルロ法による線量分布計算をSIMD、ビデオカードを積極的に用いて計算精度を損なうことなく画期的に高速化するシステムを開発することを目的とする。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。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。

本研究での課題は、より高精度を追求した放射線治療用シミュレーションであると同時に、実用的時間内で計算可能なこと、さらに現在の他の線量分布計算アルゴリズムと同精度であるならば画期的に高速な計算が可能であるものを設計することである。

3. 研究の方法

(1) 開発環境とシステムの構築

- ・ 加速器のモンテカルロ計算の高速化では
- ・ 計算精度の保証
- ・ 加速器、人体内の吸収線量を計算可能

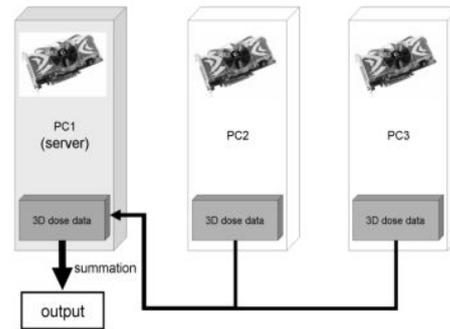


図2 PC間での並列処理

という条件を満たす必要があった。本研究ではモンテカルロ法としてNRCC(National Research Council of Canada)により開発されたEGSnrcを用い、基本的にアルゴリズム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、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ったため、積極的にハードウェアを利用しているとはいえなかった。そこで粒子の座標を表す変数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。並列可能部分を手作業で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。研究開始当初はCPUとしてIntel 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同時に4並列での演算が可能であった。平成19年度に新規PCを設置し、Intel Core2 Quad 2.66 GHzとなりSIMDの並列性は4倍に向上したため、変更部分の速度向上率は変更前の約7倍になった。GPUプログラムのために用いたハードウェアは研究開始当初は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。GPU内におけるモンテカルロ法の計算では、計算に用いられる粒子1つあたりの持つべきデータが非常に大きいこと、乱数の発生をGPU内で完結することが困難であったこと、粒子の相互作用のサブルーチン全てをGPU内で管理することがプログラム上困難であったこと等により、CPUのみでの計算と比較して2倍程度の向上に留まったが、平成20年度に導入したNVIDIA製Geforce GTX280と、開発をNVIDIAのGPGPU(General Purpose GPU)開発アーキテクチャであるCUDAに変更することにより、CPUで行う必

要があった処理の多くを GPU に移行することが可能となった。

(2) GPU によるモンテカルロ法の開発

CPU の SIMD 機能と GPU を同時にシミュレーション計算に用いることにより計算時間の短縮を行った。開発は GPU でシミュレーションコードを実行するシステムの開発から行われた。GPU での処理のために新規に作成されたコードと CPU, GPU への移行の割合の一部を表 1 に示した。モンテカルロ計算の高速化に不可欠な電子の相互作用についてはほぼ GPU 内で処理を完了することが可能となったが、光子の相互作用では、一部 CPU を必要とする処理が残された。また、乱数は RANMAR 乱数からメルセンヌツイスタに変更し、発生ルーチンは GPU に実装した。図 1 に吸収線量の出力ルーチンの PC 内の並列化の模式図を示した。CPU と GPU を同時に用いることにより計算の高速化がおこなわれている。また、PC 間をネットワークで接続した場合は、図 2 に示すようにそれぞれの計算結果の合計がサーバーとなる 1 台の PC から最終的なシミュレーション結果として出力され、並列化を行わない場合と同様の処理を可能とするよう設計を行った。

(3) 処理高速化のためのデータ圧縮

モンテカルロ計算で用いられるボクセルデータは CT 画像のボクセルデータと比較して単純であるため、大部分を整数によるデータ圧縮することが可能である。そこで、これらのデータは run-length による圧縮を CPU 内で行い、圧縮データを直接 SSE および GPU 内で展開しながら計算を行うこととした。

計算により求められた線量分布データは単精度浮動小数点で表現されており、数値の変動があるため、浮動小数点の可逆圧縮を行う必要があった。浮動小数点データは IEEE 754 single で表現され、符号 (1 bit)、指数部 (8 bit) 仮数部 (23 bit) で表現される。浮動小

表 1 主な相互作用と使用演算装置

光子の相互作用	演算装置
Pair production.	CPU+GPU
Compton scattering.	CPU+GPU
Photoelectric effect.	GPU
電子の相互作用	
Møller (e-e-) and Bhabha (e+e-)	GPU
Continuous energy loss applied to	GPU
乱数	
Production	GPU
Control	CPU+GPU

数の可逆圧縮は指数部 7 bit (A パート) と指数部 1 bit + 仮数部 23 bit (B パート) を分離し、A パートを run-length ・予測符号化し、B パートを 2 次元データとして扱い、run-length ・ソート ・予測符号化により圧縮を行った。ソートは 4×4 のデータに対してパターンを 256 通り与え、4×4、16×16 データに階層的にパターンを適用することによりデータの平均情報量を下げる働きを持つ。ソート適用後、DPCM により圧縮を行った。

圧縮データは、CPU 側では SIMD 機能により処理を高速化し、GPU では CUDA によるソート計算機能とビット演算機能を用い、全て GPU 内部で展開を行うことにより、オーバーヘッドを軽減した。

4. 研究成果

本学に設置された Varian 社製 Clinac 21EX 6 MV X 線の加速器と、40×40×40 cm³ の水ファントムを計算機に構築し、上記システムを搭載した 6 台の PC に加速器データ及びファントムデータを転送して並列計算を行った。PC 1~3 台のときの計算時間の変化を図 3 に示した。図 3 は上から最適化なし、SIMD コンパイラオプションあり、開発した SIMD(CPU)コード、開発した GPU のみを動作させるコード、SIMD(CPU)と GPU を同時に使用した場合の計算時間の比較である。図 3 の横軸は並列化時の計算時間の変化を表し、3 PC までの並列処理結果である。図 3 より、1 シミュレーションにかかる時間が 8 時間から 20 分程度とすることが可能となった。

モンテカルロ計算による統計誤差 3 % 以内の線量分布データについて、元データに対する圧縮後のデータサイズを表 2 に示した。10×10 cm² のファントムデータは 1.0×1.0×1.0 mm³ 間隔とし、合計で 401×401×400 の単精度浮動小数点データ数となり、非圧縮で約 245.4 MB であった。正方形照射野については約 1/10 となった。また、照射野サイズにより圧縮率は大きく変動することが確認された。また、図 4 に 6 台の PC で並列計算した場合の計算時間の経過によるデータ転送時間の変化を示した。データの統計変動が小さくなるほど線量分布データの転送速度が向上していることが確認された。CPU ・ GPU による

表 2 圧縮率の例

Field shapes	Field size [cm ²]	Compressed size [MB]	Compression ratio
square	10×10	23.6	9.62×10 ⁻²
square	25×25	58.8	2.37×10 ⁻¹
IMRT prostate	irregular	40.6	1.65×10 ⁻¹

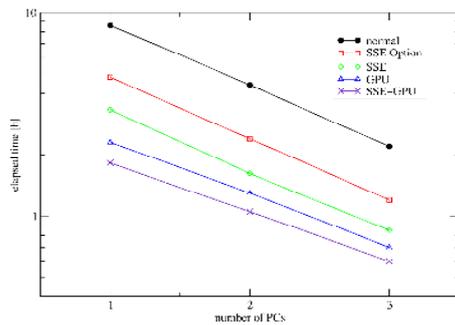


図3 シミュレーションの方法と計算時間の変化

上から最適化なし、SIMD コンパイラオプションあり、提案法による SIMD(CPU)コード、GPUのみ、SIMD(CPU)+GPUによる計算時間の比較。横軸は並列化の効果で、3PCまでの並列処理結果を表示

リアルタイム圧縮により、出力される線量分布データ転送の高速化が可能となることが確認された。本手法はPCのネットワーク間データ転送の高速化のみではなく、PC内のデータ転送に利用することにより、モンテカルロ計算の更なる高速化も可能となった。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。ただしコンパイラオプションは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。粒子の座標表示に単精度浮動小数点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。

本研究ではGPU内蔵メモリ内でシミュレーションを完結することが課題であった。これを積分演算の展開、乱数発生装置のGPU内蔵によりほぼ達成することができた。また、高速化が進むにつれてメインメモリー-GPU間のアクセス回数が増加することが計算時間短縮を困難としたが、平成20年に導入した階層型可逆圧縮アルゴリズムをGPU内で行うことによりメインメモリアクセスのオーバーヘッドを低減することに成功した。このアルゴリズムをPC間の並列演算にも利用することにより、線量分布データのネットワーク転送速度の向上も達成され、10台以上の並列計算においてもほぼ直線的に計算速度を向上させることを可能とした。GPUについては機能の向上が日進月歩であり、メインメモリー-GPU間のデータ通信にも新手法が登場している。これら最新の機能を本手法に適用することにより、現状よりもさらに高速化されることが予想される。本研究により、複雑・高度化する放射線治療計画をモンテカルロ法により現実的な時間で検証することの

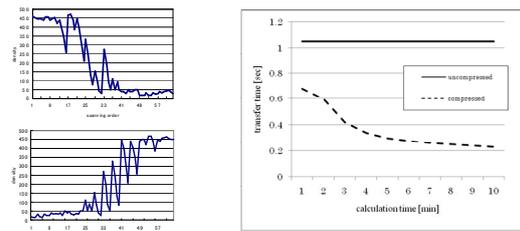


図4 データのソートによる効果(左)とデータ圧縮による吸収線量データの伝送時間の変化(右)

可能性が示された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ① Toru Kawachi, Hidetoshi Saitoh, Mitsuhiro Inoue, Tetsuro Katayose, Atsushi Myojoyama, Kazuo Hatano, "Reference dosimetry condition and beam quality correction factor for CyberKnife beam," *Med. Phys.* 35(10), 4591-4598, 2008. 査読有。
- ② 齋藤公明, 齋藤秀敏, 国枝悦夫, 成田雄一郎, 明上山温, 他18名, "放射線治療の高度化のための超並列シミュレーションシステム," *情報処理*, Vol.48, No.10, 通巻512号, 1081-1088, 2007. 査読有。

[学会発表] (計5件)

- ① Atsushi Myojoyama, Hidetoshi Saitoh, "GPU-Based Monte Carlo Calculation for Accurate 3D Dose Distribution," The 5th Korean-Japan Joint Meeting on Medical Physics, 4 pages, CD-ROM, 2008年9月10日, 済州島(韓国)。
- ② 明上山温, 齋藤秀敏, "高速モンテカルロ計算の精度に関する検討," *The Journal of JASTRO*, Vol.20, Supplement1, 2008年10月17日, 札幌(北海道)。
- ③ 明上山温, 齋藤秀敏, "ハードウェア高速化によるモンテカルロ線量分布計算システム," 0110, *医学物理 Sup.2*, Vol.28, Supplement No.2, 246-247, 2008年4月6日, 横浜(神奈川)。
- ④ 明上山温, 齋藤秀敏, "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," FIT2007 第6回情報科学技術フォーラム講演論文集, CD-ROM, G-032(2pages), 2007年9月7日, 豊田市(愛知県)。
- ⑤ 明上山温, 齋藤秀敏: ハードウェア並列処

理による高精度三次元線量分布計算. 日本腫瘍学会第 20 回学術大会報文集, P-257, 202, 2007 年 12 月 14 日, 福岡市(福岡県).

6. 研究組織

(1)研究代表者

明上山 温 (MYOUJOUYAMA ATUSHI)
首都大学東京・人間健康科学研究科・助教
研究者番号 : 90347279