

平成 29 年 6 月 23 日現在

機関番号：32201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400296

研究課題名(和文) 高速・高精度な放射線シミュレーションのためのGPUによる適応的四面体モデルの構築

研究課題名(英文) GPU-based Adaptive Tetrahedron Model Generation for Fast and Accurate Radiation Simulation

研究代表者

木村 彰徳 (Kimura, Akinori)

足利工業大学・工学部・教授

研究者番号：60373099

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,700,000円

研究成果の概要(和文)：コンピュータはハードウェアとソフトウェア技術の発展によって性能が向上し、物理学、宇宙科学や医療など様々な分野でコンピュータシミュレーションが利用されている。一方で、計算精度の向上のためにより複雑なシミュレーションが必要になり、結果的にさらなる計算速度の向上が必要となっている。計算精度を向上させる一つの手法として、人体や測定器等のより詳細な構造をモデリングする適応的四面体格子が用いられている。本研究では、高速で高精度を実現するシミュレーションで利用する三次元形状の適応的四面体モデルの生成を行うためのアルゴリズムの開発を行った。さらに、そのモデルを描画する応用ソフトウェアの開発を行った。

研究成果の概要(英文)：The computer simulation is exploited in various areas such as physics, space science, medical science and so on. It is required to make calculations fast and accurately for complex and large scale simulations. The adaptive tetrahedral mesh is one of the modeling methods to represent target objects for the purpose of the accurate simulations. Besides, GPU (Graphics Processing Unit) provides the massively parallelization for high-speed calculations. In this research, algorithms to generate the adaptive tetrahedral mesh of three dimensional objects and search adjoining cells in the mesh are developed. The mesh model is exploited for high speed and accurate radiation simulations. Furthermore, an application software to visualize the mesh model was developed.

研究分野：計算科学

キーワード：測定器シミュレーション GPGPU 三次元形状モデリング 適応的四面体

1. 研究開始当初の背景

コンピュータのハードウェアとソフトウェア技術の発展により、様々な分野でコンピュータシミュレーションが利用されるようになってきている。しかし、計算精度の向上のためにより複雑なシミュレーションが必要になり、結果的に計算速度のさらなる高速化が要求されている。ハードウェアにおいては、CPU メーカーはマルチコア CPU の 1 CPU あたりのコア数をさらに増加させるロードマップを公開している。また、同様に GPU (Graphics Processing Unit) も処理能力を上げるためにプロセッサコア数を増加させるなどの開発が進んでいる。

シミュレーションによる高速で高精度な結果を得るためには、CPU や GPU の超並列処理や他のリソースを効率良く使うアルゴリズムの研究開発が欠かせないものになっている。

ここで、医療、宇宙科学、物理学などの分野で、遠隔医療のための基礎研究、治療精度の向上、装置の開発や最適化、新粒子探索など様々な場面で放射線シミュレーションが利用されている。そして、より高度な医療や確実にミッションを遂行するために、さらに高精度で高速なシミュレーションが要求されている。図 1 は、放射線治療の一つの陽子線治療装置のシミュレーションの結果を可視化したものである。

例えば、ガンの放射線治療に利用される治療計画装置では、5 分程度で照射する放射線の分布を計算する必要である。そのため、物理現象や患者の臓器をモデリングした解析的な高速シミュレータが利用されている。一方で、より高精度な検証には、モンテカルロ法を用いて物理現象を再現したシミュレーションを行っている。しかしながら、モンテカルロ法による計算では、PC クラスタによる MPI (Message Passing Interface) を利用した並列計算でも時間オーダーの計算時間を必要としている。

放射線シミュレーションで精度を上げるためには、3次元形状をできるだけ細かい領域で区切ったモデルを使うことが一つの解決方法である。これは、その領域の中を通過する放射線の振る舞いをより正確に再現できるからである。しかしながら、メモリ容量や計算時間とのトレードオフで一つ一つの領域を大きくせざるを得ない。

そのため、一つの解決方法として、物質の変化に対してサイズを適応的に変化させた適応的四面体格子を用いて、人体、シリコン素子、測定器等の詳細な構造をモデル化することが研究されている。

そこで、コンピュータビジュアライゼーションや医療画像処理の分野で進んでいる格子生成や領域抽出、さらにそれらの高速化などの研究成果を応用することで、その放射線シミュレーションの精度の向上や高速化に利用できると考えている。

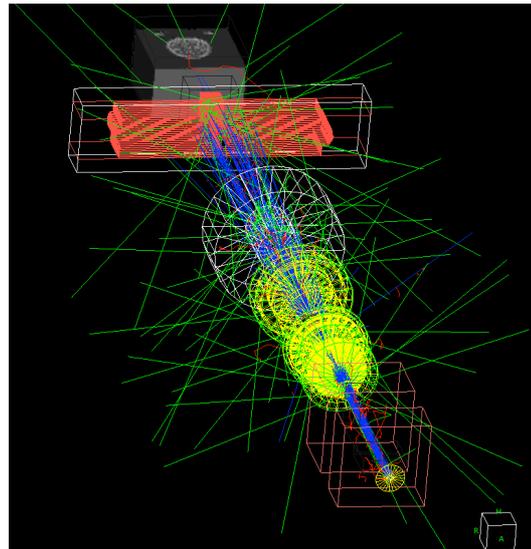


図 1 粒子線治療装置の放射線シミュレーションと放射線の軌跡の可視化。

2. 研究の目的

医療、宇宙科学、物理学などの分野におけるシミュレーションの対象物をモデリングするときのデータとなるボリュームデータ (例えば医療や産業分野で用いられている CT (Computed Tomography) スキャナで取得したデータから構築したもの) を利用する。本研究では、このボリュームデータからシミュレーションで必要となる 3次元形状の適応的四面体格子モデルを GPU で高速に生成するアルゴリズムを開発する。

高速かつ高精度なシミュレーションのために、適応的四面体格子の隣接する四面体セルの高速な検索を考慮した領域抽出を新たに開発する。また、このアルゴリズムを基に、応用ソフトウェアを開発しオープンソースとして公開することで、利用できるアルゴリズムの開発を目指す。

既に、PC クラスタなどの並列計算環境で実行できる、適応的四面体格子の生成及び並列三次元領域抽出に関する研究を行っている。これらの研究で開発したアルゴリズムを GPU で実行するために、適応的四面体格子の生成及び領域抽出手法のアルゴリズムのデータモデルの改良または見直しが必要となる。

構築したモデルとシミュレーション結果の可視化に関しては、本研究では、既に研究開発されている GPU を用いた適応的四面体格子の可視化技術を応用することを考えている。

GPU だけでは行えない高精度で大規模なシミュレーションに対しては CPU による処理と GPU の協調処理をすることで、GPU が担当できる処理領域を増やすことができ、より高速なシミュレーションの実現に寄与できると考えている。

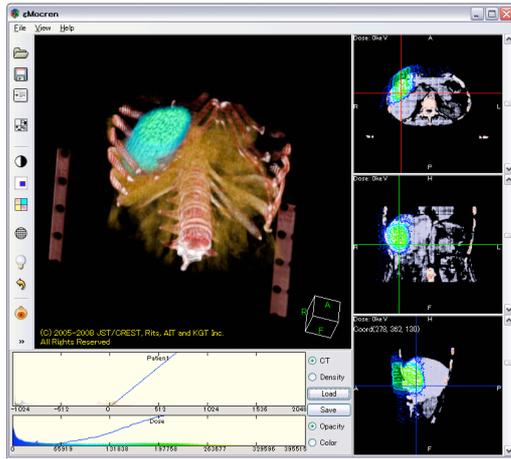


図2 gMocren: 放射線シミュレーションの結果を可視化する応用ソフトウェア.

3. 研究の方法

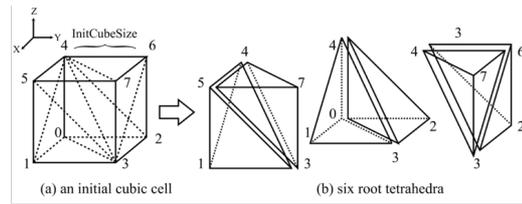
ボリュームデータの適応的四面体格子モデルの生成については, 以前の研究 (文献 1, 2) の適応的四面体格子の並列生成アルゴリズムを元に開発を行う. しかしながら, このアルゴリズムはマルチコア CPU または PC クラスターの並列処理環境に依存した設計になっている. そのため, GPU の超並列処理のためのジョブ分割やメモリ管理などに適した実装になるように再設計する必要がある.

適応的四面体格子モデルの生成アルゴリズムによって, 正しくモデルが生成されているかの検証のために, 生成した格子モデルを描画するための応用ソフトウェアを開発を行う. このソフトウェアは, 最終的に公開することを考慮して, GUI (Graphical User Interface) を備えたものにする. このソフトウェアのプロトタイプを開発するために, CPU で実行できる適応的四面体格子の生成アルゴリズムを実装する. 応用ソフトウェアの開発も進めつつ, 高速化のための GPU に適した実装のためのアルゴリズムの再設計が必要である.

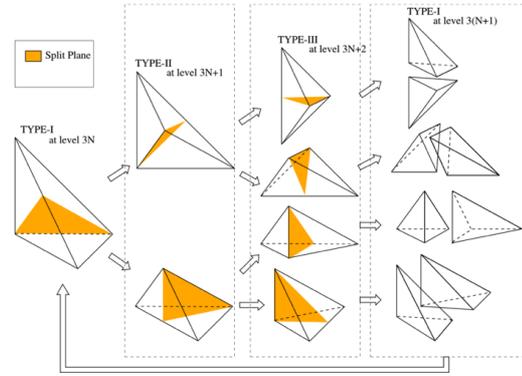
また, ボリュームデータの描画のためにボリュームレンダリングを実装する必要がある. そのため, 放射線治療シミュレーション用の可視化ソフトウェアの gMocren (雑誌論文①) を参考に開発を進める. gMocren は, 図 1, 図 2 に示すように, 放射線シミュレーションの計算結果を可視化する応用ソフトウェアである. Web ページで公開し, 今までに 1,800 を超えてダウンロードされている.

4. 研究成果

本研究で採用した適応的四面体格子の生成アルゴリズムを簡潔に説明する. 図 3 に示すように, まずボリュームデータを立方体セルに分割し, それぞれ 6 分割することで四面体を生成する. 次に四面体を 3 段階の周期的な 2 分割を再帰的に行うことで最小セルまで分

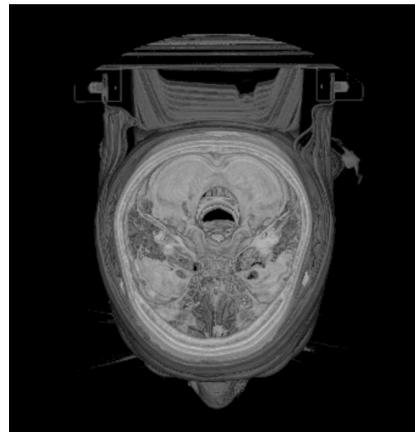


(a)

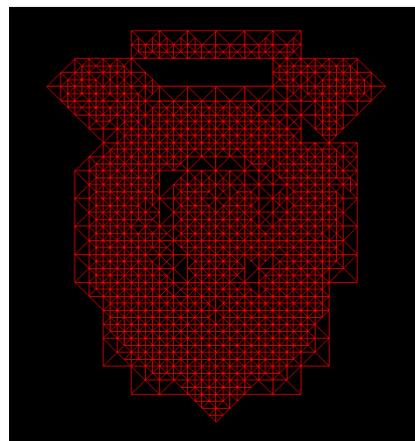


(b)

図3 ボリュームデータの適応的四面体格子モデル生成における, (a)立方体セルの初期四面体生成と(b)四面体の周期的な 2 分割による細分化.



(a)



(b)

図4 (a)CT スキャナで取得した頭部のボリュームデータと (b)適応的四面体格子モデル.

割することができる。そして、分割してできた四面体の一様性を評価し、一様と判断された四面体は2分割処理の反対の2統合処理を再帰的に行う。この手順でできた四面体の集合は、一様でないところは最小の四面体で、一様なところは統合した大きな四面体となり、適応的四面体格子が生成される。このアルゴリズムで生成した適応的四面体モデルを図4に示す。図4(a)はCTスキャナで取得した頭部のボリュームデータで、図4(b)がそのボリュームデータから生成した適応的四面体モデルである。ただしここでは、四面体の格子が確認できるように、元のボリュームデータのボクセルを間引き(データ点数を減らし)、最小の四面体が小さくなりすぎないようにして描画している。

図5は応用ソフトウェアでボリュームデータを描画したものである。ボリュームデータの適応的四面体モデルを描画するためにレイキャスティング法によるボリュームレンダリングを実装した。この実装はCPUのみを使うソフトウェアレンダリングである。図5(a)はCTスキャナで取得した胸部のボリュームデータを3次元描画したものである。図5(b)はMPR(Multi-Planar Reconstruction)による3断面画像である。図5(c)はボリュームレンダリングの伝達関数を調整するための設定ウィンドウである。また、図4の適応的四面体モデルの描画もこの応用ソフトウェアで描画したものである。その他にも照明の位置や強さ、モデルの断面を3次元描画するため機能などを実装している。

適応的四面体格子の生成アルゴリズムのGPUを用いた高速化のための開発は、まだ実装していないためその評価や最適化を含めまだできていない。応用ソフトウェアは、GPUによる適応的四面体モデルの生成を除き完成させることができた。今後、GPUによる生成アルゴリズムの実装を完成させて、応用ソフトウェアをオープンソフトウェアとして公開する予定である。

<引用文献>

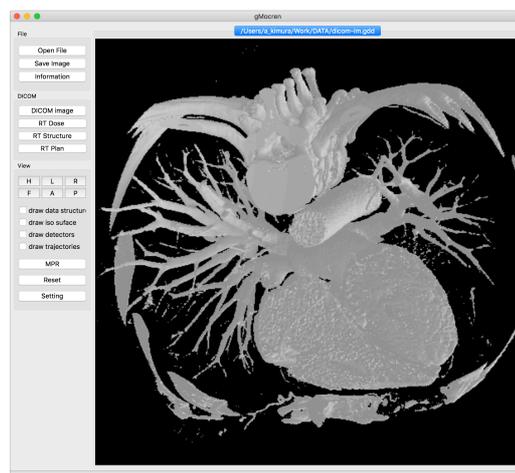
- ① 高間康文, 木村彰徳, 田中弘美, ボリュームデータの適応的四面体メッシュ表現並列生成アルゴリズム, 情報処理学会論文誌, 査読有, Vol. 48, No. SIG 9, pp. 64-76, 2007.
- ② 木村彰徳, 山添悠, 田中覚, 田中弘美, ボリュームデータの局所特徴に基づく並列三次元領域抽出, 画像電子学会論文誌, 査読有, Vol. 38, No. 4, pp. 471-480, 2009.

5. 主な発表論文等

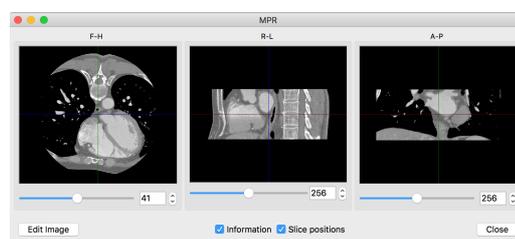
(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

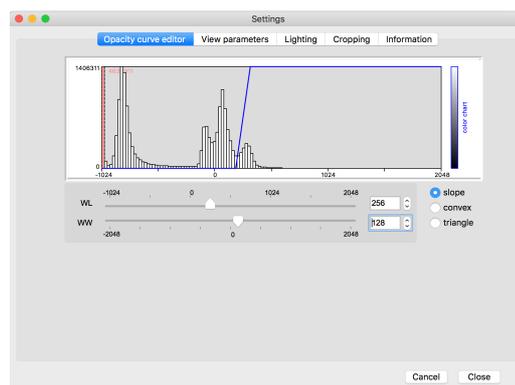
- ① A. Kimura, H. Hasegawa, A. Saitoh, S. Tanaka, gMocren: Visualization software for Monte Carlo simulators for



(a)



(b)



(c)

図5 ボリュームデータの適応的四面体格子モデルの描画のための応用ソフトウェア。(a)メインウィンドウ, (b)MPRによる3断面画像, (c)レイキャスティングの伝達関数を調整する編集ウィンドウである。

radiotherapy, Journal of Advanced Simulation in Science and Engineering, Vol. 2, No. 1, pp. 45-62, 2015. 5.

<http://doi.org/10.15748/jasse.2.45>

[学会発表] (計4件)

- ① A. Kimura, H. Hasegawa, A. Saitoh, S. Tanaka, gMocren: Visualization software for Monte Carlo simulators for radiotherapy (Invited Talk), The 35th JSST Annual Conference International Conference on Simulation Technology, JSST 2016, 2016.10, Kyoto, Japan.

- ② M. Gerritsen, N. Henderson, K. Murakami, S. Okada, T. Sasaki, A. Kimura, M. Asai, A. Dotti, MPEXS: A CUDA MonteCarlo of the simulation of electromagnetic interactions, 22nd International Conference on Computing in High energy and Nuclear Physics (CHEP 2016), 2016.10, San Francisco, USA.
- ③ A. Kimura, S. Tanaka, Volume Visualization Using Adaptive Tetrahedral Mesh with GPU-Accelerated Fast Cell Search, 2015 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), p.1-4, Nov. 2015, San Diego, USA.
- ④ A. Kimura, Integration of GPGPU for EM physics, 11th Geant4 Space Users' Workshop, 2015.8, Okinawa, Japan.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木村 彰徳 (KIMRUA AKINORI)

足利工業大学・工学部・教授

研究者番号：60373099