

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23602003

研究課題名(和文)画像処理用並列演算素子に最適化された粒子線線量分布計算法の開発とその精度評価

研究課題名(英文)Dedicated calculation method using GP-GPU to dose distribution in particle therapy.

研究代表者

榮 武二(Sakae, Takeji)

筑波大学・医学医療系・教授

研究者番号：60162278

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円、(間接経費) 1,260,000円

研究成果の概要(和文)：陽子線治療に使用する3次元線量分布計算アルゴリズムを開発し、画像処理用並列演算素子を使った計算速度の高速化について調べた。この目的のために新たに作られた線量分布計算プログラムを使い、計算効率をどこまで上げられるかの試験を行った。本研究で開発した方法は、シンプルな計算法でありながら、物質中で減速する陽子の基本的な過程のほとんどを考慮しており、取り扱う物理過程と結果の精度は、精密なモンテカルロ法のそれに匹敵する。並列化の効率を調べるために、実数演算で使用するメモリー容量を変えてテストを行った。

研究成果の概要(英文)：A new algorithm to calculate 3 dimensional dose distribution in particle therapy is investigated, and the calculating speed is studied by using the general-purpose computing on graphics processing units. The model, with a very simple calculation procedure, includes almost all of the fundamental processes of proton energy deposition. By the inclusion of the processes, the accuracy of the new method looks similar to that of Monte Carlo method. The efficiency of the parallel processing was studied for different sizes of memory for the calculation.

研究分野：医学物理学

科研費の分科・細目：医学物理学・放射線技術学

キーワード：陽子線治療 治療計画 3次元線量分布計算法 並列処理 GPU

## 1. 研究開始当初の背景

粒子線治療の特徴は1回の線量の集中性の良さであり、患者に対する身体的負担が極めて少ない治療を実現できる。この特徴を活かす治療法では、病巣に十分な線量を与える一方、その周辺の正常組織への影響は極力抑えなければならない。治療計画の線量分布計算により治療前にこれらの確認が必要であり、治療計画段階での精度の良い評価(3%)が重要である。ところが、現在治療計画で使用されている線量分布計算法は十分な精度が得られない場合がある。体内の密度変化が大きく、その変化がビームの入射方向と垂直な平面内で起こる場合は、広く採用されているペンシルビーム法の計算精度が落ちることがわかっている。計算による評価の精度の劣化は場合により10%を超える。

粒子線治療を含め、放射線治療機器は、治療中の腫瘍の縮小、変形などにあわせて、随時照射条件を調整するアダプティブ・ラジオセラピーのための開発が行われている。条件変更による治療計画の再計算に必要な時間の短縮に逆行して、高精度化と最適化のための繰り返し計算は、治療計画システムの即応性をなくしてしまう。高精度と即応性は、現在使われている計算法では両立が困難と考えられる。(例えば、高精度のモンテカルロ法の並列化により100倍の演算速度が達成できたとしても、1つの分布を計算するために数分から数10分が必要となり、照射条件の最適化の繰り返し計算に1時間以上必要となる。治療現場の即応性のためには全ての計算時間を数分以下に抑えたい。)本研究の提案は、計算機の並列化に合わせ、その計算機の仕組みに最適化されたアルゴリズムの開発を行うことにより高精度・高速計算の実現を目指す。

近年発達している画像処理用並列演算素子(GPU)は基本的な演算に対して高性能パーソナルコンピュータの数十倍以上の処理能力を持つ。この装置を汎用計算に用いる試みが様々な分野で試みられているが(GP-GPU)、その成果は今のところ並列化したパーソナルコンピュータに対して優位性が示されている例は少ない。その理由は、GPUの構造の特殊性にあり、画像処理に特化された演算素子の構造は、汎

用の演算素子用に開発されてきた計算法に合わず、その基礎的な処理能力を發揮できないためと考えられる。

## 2. 研究の目的

実用的な治療計画システムの精度を改善するためには、現在採用されているシンプルな計算法と同程度以上の計算速度を実現でき、不均一密度中の線量分布を正確に評価する手法が必要である。近年では、強度変調を行う照射法が注目され、陽子線治療においても、より複雑な分布制御が求められるようになる。これらの新しい方法においても、高速で精度が高い線量分布計算法の実現が必須である。

著者らは、多重散乱で広がっていく陽子線の粒子密度分布を数値計算用の格子(セル)上で計算する手法を開発してきた。この手法は、もともと並列化に適しており、更にGPUの構造に合うように最適化することが可能である。この計算法とGPUの組み合わせにより、これまでにない高速・高精度計算の実現を目指す。

本研究では、新しい計算法のアルゴリズムの改造を行い、GPUでの実行速度を評価しながら最適化する。また、その精度の評価を行う。この方法は、物質中で減速する陽子の粒子フルエンスが位相空間で混ざりながら輸送され、最終的にエネルギーが無くなり停止するまでの取扱いに、パーティクル・イン・セルの手法を使用する。各セルの位置の粒子フルエンス、エネルギー分布を上流から順に計算し、散乱と半影の効果が隣のセルの粒子分布との流入・流出で考慮される。更に、この方法に計算精度に影響を与えないような近似を加えることにより、不均一密度分布に対する計算精度を保ったまま、高速に線量計算を行う。

## 3. 研究の方法

計算方法の最適化を行い、基本的な線量分布について計算と実測の比較からその精度を検証しつつ、計算速度の高速化を試みる。画像処理用並列演算素子:GPUを使った計算速度を、アルゴリズムの構造を変えながら評価する。ファントム中の線量分布計算でテストを行い、既設設備で行う測定との比較を行う。実験の条件は十分な精度で測定できるように決定し、測定時間の短縮のため2次元線量分

布測定用イメージングプレートを使用できる体系とする。医療画像データを使用するためのユーザーインターフェースの開発も併行して行う。医療画像データを使った線量分布計算を行うシステムの構築を行い、その性能を調べる。人体内での線量分布評価は実測できないため、計算で決められた照射条件でファントムに照射した場合の分布を再計算し、この分布の測定により精度評価を行う。総合的な性能から、更にアルゴリズムの調整等を行う。

#### 4. 研究成果

陽子線治療に使用する3次元線量分布計算アルゴリズムを開発し、画像処理用並列演算素子を使った計算速度の高速化について調べた。この目的のために新たに作られた線量分布計算プログラムを使い、計算効率をどこまで上げられるかの試験を行った。本研究で開発した方法は、物質中で減速する陽子のフルエンスが位相空間で混ざりながら輸送され、最終的にエネルギーが無くなり停止するまでの取り扱いに粒子数密度分布を使用する。各セルの粒子数フルエンス、エネルギー分布を上流から順に計算し、取り扱う物理過程は、精密なモンテカルロ法のそれに匹敵する。並列化の効率を調べるために、実数演算で使用するメモリー容量を変えてテストを行った。結果として、CPU(i5,3.2GHz,4core)に対する計算速度として、最大で20倍程度の性能が得られることがわかった。

このアルゴリズムを活用して、陽子線治療の線量分布計算が行われた。結果、高精度の線量分布計算を高速に行うことが可能となり、これまで実現できなかった機能を治療計画システムに付加できることが示された。

陽子線治療の標的マージンは、X線治療のように視覚的に表示、確認ができない場合があり、これまで重要な課題であった。最近、スキャンニング照射用に開発された手法として、照射位置のずれや標的の変化や動きの影響を計算し、標的体積を照射角度毎に補正、増量するフィールド・スペシフィック標的体積の研究が行われている。この標的体積は、多門照射の場合に視認性が悪く、治療計画の確認、評価に適さない。本研究では、開発した高速線量分布計算法を使い、粒子線治療の標的マージンが十分に付けられているかを視覚的に確認できる方法の検討を行った。こ

の結果は、粒子線治療に特化された標的入力が可能となる新しい治療計画システムの研究に繋がる。

結果として提案された、いくつかの新しい方法は治療計画システムのユーザーインターフェースとしての適正評価を行う必要があり、今後の研究が必要である。

#### 5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計3件)

榮武二、熊田博明、安岡聖、照沼利之、  
Dedicated calculation method using  
GP-GPU to dose distribution in particle  
therapy, 日本医学物理学会学術大会、  
2014年9月25日~9月27日発表予定、  
韓国

神澤聡、納富昭弘、照沼利之、榮武二、陽  
子線のSOBP中心におけるIP応答感度の角  
度依存性、第106回日本医学物理学会学術  
大会、2013年9月16日~9月18日、大阪  
大学

S.Kamizawa,T.Sakae, et al.,  
Dependence of dose distribution on the  
scanning direction in proton therapy for  
a respiratorily moving target, 第105回  
日本医学物理学会学術大会、2013年4月  
11日~4月14日、横浜

〔その他〕報告書

プログラムC U D A化作業報告書1、プ  
ログラムのLINUX環境への移植、平成  
24年2月27日、株式会社 ユニットコム  
プログラムC U D A化作業報告書2、並  
列化のためのプログラムの書き換え、平  
成24年3月27日、株式会社 ユニット  
コム

プログラムC U D A化作業報告書3、高  
速化のためのプログラムの調整、平成  
24年3月27日、株式会社 ユニットコム

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

榮 武二(SAKAE, Takeji)  
筑波大学・医学医療系・教授  
研究者番号:60162278

(2)研究分担者

熊田 博明(KUMADA, Hiroaki)  
筑波大学・医学医療系・准教授  
研究者番号：30354913

安岡 聖(YASUOKA, Kiyoshi)  
筑波大学・医学医療系・講師  
研究者番号：50200499

照沼 利之(TERUNUMA, Toshiyuki)  
筑波大学・医学医療系・助手  
研究者番号：40361349