

Title	並列処理による外照射線量計算の高速化の検討
Author(s)	国枝, 悦夫; 安藤, 裕; 塚本, 信宏 他
Citation	日本医学放射線学会雑誌. 1994, 54(6), p. 520-529
Version Type	VoR
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/16861">https://hdl.handle.net/11094/16861</a>
rights	
Note	

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

## 並列処理による外照射線量計算の高速化の検討

国枝 悦夫 安藤 裕 塚本 信宏  
伊東 久夫 久保 敦司

慶応義塾大学放射線科学教室

### Parallel Processing of Dose Calculation for External Photon Beam Therapy

Etsuo Kunieda, Yutaka Ando,  
Nobuhiro Tsukamoto, Hisao Ito  
and Atsushi Kubo

We implemented external photon beam dose calculation programs into a parallel processor system consisting of Transputers, 32-bit processors especially suitable for multi-processor configuration. Two network conformations, binary-tree and pipeline, were evaluated for rectangular and irregular field dose calculation algorithms.

Although computation speed increased in proportion to the number of CPU, substantial overhead caused by inter-processor communication occurred when a smaller computation load was delivered to each processor. On the other hand, for irregular field calculation, which requires more computation capability for each calculation point, the communication overhead was still less even when more than 50 processors were involved. Real-time responses could be expected for more complex algorithms by increasing the number of processors.

Research Code No. : 201

Key words : Parallel processing, Dose-calculation,  
Radiotherapy

Received May. 24, 1993 ; revision accepted Jul. 28, 1993

Department of Radiology, Keio University

### はじめに

RISC (Reduced Instruction Set Computer) 技術などに代表されるハードウェアの進歩より、計算機の処理速度は飛躍的に向上しているが、それでも単一 CPU (Central Processing Unit) の処理能力には限界がある。一方、3次元治療計画では計算点の数は膨大となり、かつより精度の高い線量計算アルゴリズムが求められているが、これらの方法は計算時間も飛躍的に増加する。特に、リアルタイムで表示をする場合にはさらに高速な線量計算が必要とされる<sup>1),2)</sup>。

複数の CPU を組み合わせた並列マルチプロセッサ・システムではおのおの CPU が平行して同時に別々の処理を行うため、全体としての計算時間を大幅に短縮できる。しかしながら、CPU の数が増えるに従って、CPU 間データ転送による時間損失 (オーバーヘッド) が増加し、計算効率の上で問題となる。また、ネットワーク形態、計算負荷量によっても CPU 間の負荷の分散などが変化して計算効率が変わり得るので、必ずしも CPU の数を増やすのみでは効率的でない。

われわれは、並列処理用 CPU であるトランスピュータにて構成された並列マルチプロセッサ・システムを放射線治療計画システムに適応する上での問題点を検討した。また、CPU 数とネットワーク形態を変化させて、矩形および不整形照射野の X 線外照射の線量計算に最適な CPU 数とネットワーク形態を評価した。

方 法

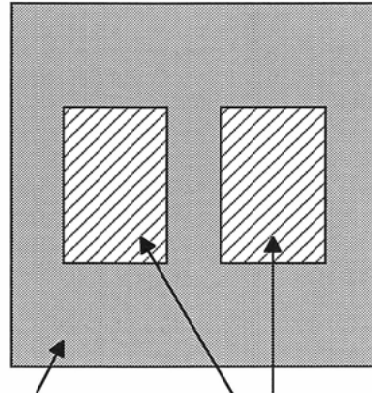
装置構成

並列処理用に Inmos 社の 32 ビット RISC - CPU: トランスピュータ T800 (クロック数 25MHz) を使用した. キーボードなどのユーザーインターフェイスや外部記憶装置などの入出力機能は日本電気製パーソナル・コンピュータ, PC9801FA (以下 PC とする) で行った. PC の拡張スロットに挿入可能な, 5 台のトランスピュータを搭載した基板 (神戸製鋼所 KTR-B08F) 上でトランスピュータによる計算処理を行った. PC に直接接続されるトランスピュータは 1 台 (ルート・トランスピュータ) のみであり, 他のトランスピュータ (トランスピュータ・モジュール) はこれに高速接続線 (シリアルリンク) で接続される. ルート・トランスピュータは 2Mbyte のメモリーを, その他のトランスピュータ・モジュールは 1Mbyte のメモリーを搭載している.

ファントムと線量計算法

肺を模擬した不均質部分を含む, 512×512 マトリックスの CT 画像相当のデータを作成した (Fig. 1). 不整形照射野はマントル照射の形状を模擬した<sup>3)</sup>.

矩形照射野計算では 3 門照射にて 1 門当たり 50×50 の格子点で, 合計 7500 点について, 不整形照射野計算では 2 門照射にて計 5000 点について計算を行った (Table 1). 矩形照射野での線量計算法には Ratio-TAR 法<sup>4)</sup>を用い, 不整形照射野では Clarkson の SAR 法<sup>5)</sup>を用いている. CT データは 128×128 の電子密度配列に変換し,



30 X 30 cm ( 300 X300 pixel) 50 HU  
8 X 14 cm ( 80 X 140 pixel) -700 HU

Fig. 1 Chest phantom data: A simulated chest CT data is generated, which includes two symmetrical rectangles (-700 Hounsfield Unit: HU) representing lungs. Generic structure is a square of soft tissue density (50HU).

radiological path-length 法にて不均質密度補正を行っている. 不整形照射野では 1 次線のみ不均質密度補正を行っている.

ソフトウェア構成

C 言語で記述された, 光子外照射の矩形および不整形計算プログラム<sup>6)</sup>をトランスピュータ上に移植した. 並列処理の記述は Parallel C (3L 社)<sup>7)</sup>を用いて行った. Parallel C は通常 C 言語に並列処理用の制御関数を追加した並列処理の記述が可能な言語であり, トランスピュータ上で動作する.

まず, 計算プログラムのタスク構成を変更せず

Table 1 Parameters of the sample dose-calculation

	Rectangular field	Irregular field
No. of Beams	3	2
Calculation Matrix	50×50	50×50
Calculation Points	7500	5000
Inhomogeneity correction	Path length	Path length (primary dose)
Initial data	TAR, OCR	TAR, SAR, Field shape
Field	10×10cm	Mantle (48 points)

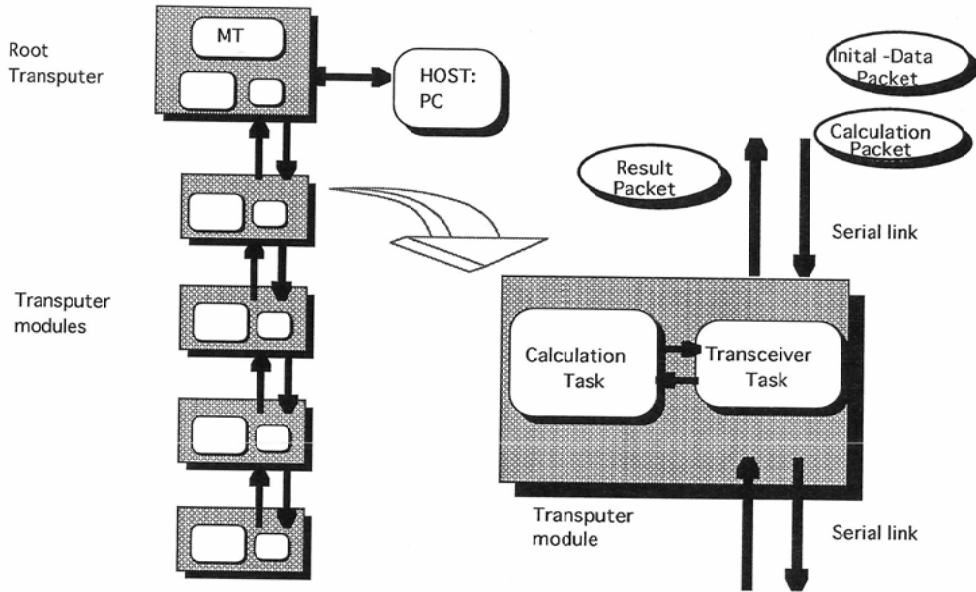


Fig. 2 Data link scheme (Pipeline)

(1) Initial-data is broadcast to all calculation tasks once in the beginning of the execution. (2) Master task (MT) on the root Transputer propagates calculation packets to the transceiver task on the Transputer module next to the root. (3) Transputer task that received a calculation packet feeds the packet into the local calculation task. If it is in calculation, the packet is passed onto the downstream transputer module. (4) The results of the calculation are returned to the transceiver task and collected to the master task.

に、Parallel Cの仕様に合致するように若干の変更を加えトランスピュータ上での動作を確認した後、計算部分を並列化する目的でいくつかのタスクに分割した。

#### 並列処理の実行

本処理に先立って、CTより得られた電子密度配列や、ビーム・データ、TAR、OCRまたはSAR表などの各計算点での線量計算に共通な基本データ（初期データ）を、PCよりルート・トランスピュータを介して各トランスピュータに転送する。次にルート・トランスピュータ上のマスター・タスクは、位置情報などの各計算点ごとに違うパラメータをまとめたデータ単位（計算パケット）をトランスピュータ・ネットワークに送出する。ネットワークの各トランスピュータはルートに近いものから計算パケットを受け取る。なお、今回の構成では1計算パケットは1計算点に相当する。

各モジュールは、計算タスクと送受信タスクに

分割されており、送受信タスクは、接続された計算タスクが空いていればパケットを渡し計算させる。もし、すでに計算中であれば、次のモジュールにパケットを順に引き渡す。すべてのモジュールが計算中であれば、次の空モジュールを待つ待ち行列ができる。また、計算結果は結果パケットとして送出され、送受信タスクを介してルート・トランスピュータ上のマスター・タスクに集められる (Fig. 2)。

#### 計算速度の測定

まず、予備実験として、実際の計算を行わずに、5台のトランスピュータを直鎖状に配列した線状ネットワーク構成 (Fig. 8(A)) において、計算パケット（約30byte）の転送、初期データ（約24kbyte）の送出のみを試み、データ転送時間の測定を行った。なお、時間測定は精度を要するため、実計算時間に影響を及ぼさないように注意してプログラム内部に時間測定機能を組み込み、システムの内部時計機能により測定した。

次に、線状ネットワーク構成において、実際に CPU の数を 1 台から 5 台と変化させ、前記の条件にて矩形および不整形照射野にて計算速度を比較した。また、マルチプロセッサ・システムでは各 CPU 間の負荷分散が問題となるため、各 CPU で実行された計算パケット数を計数した。

ネットワーク形態による転送効率の比較のため、2 分木状 (Fig. 8(B)) と線状ネットワーク構成での初期データ転送時間の変化を比較した。トランスピュータではマルチタスク・システムを実際の CPU の数と独立して設定し、1 CPU の上で模擬的にマルチプロセッサ・ネットワークを構成できる。実験に使用できる CPU 数が限られていたため、模擬的マルチプロセッサ・ネットワークにてプロセス数を変化させて、初期データ転送終了までの時間を比較した。

**結 果**

実際の計算を行わず、計算パケット数を変化させた場合の、パケット転送終了までの時間を Fig. 3 に示す。パケット数の増加にほぼ比例して転送時間が増加した。パケット 1 個当たりの転送時間は約 0.04ms であった。また、同様に初期デ

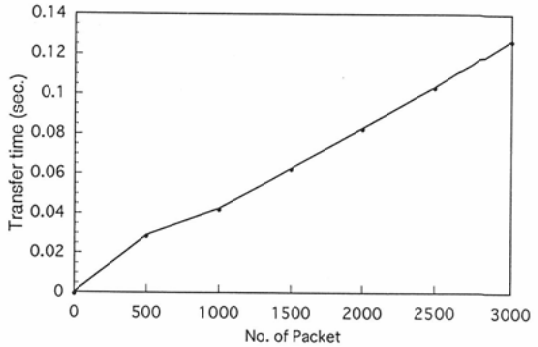


Fig. 3 Calculation packet transfer time: Calculation packets were transferred to the Transputers. No calculation was performed. The figure shows the total transfer time (vertical axis) increases as the number of the transferred packet (horizontal axis) increases.

ータのみを転送した場合、1 CPU 当たりの転送時間は約 20ms であった。

線状ネットワーク構成で CPU の数を 1 台から 5 台と変化させた場合の総計算時間の測定結果を Fig. 4 に示す。不整形照射野計算では矩形照射野に比べ、かなりの計算時間を要すが、ともに CPU 数の増加にほぼ反比例して計算時間が減少している。1 CPU での計算時間を総パケット数

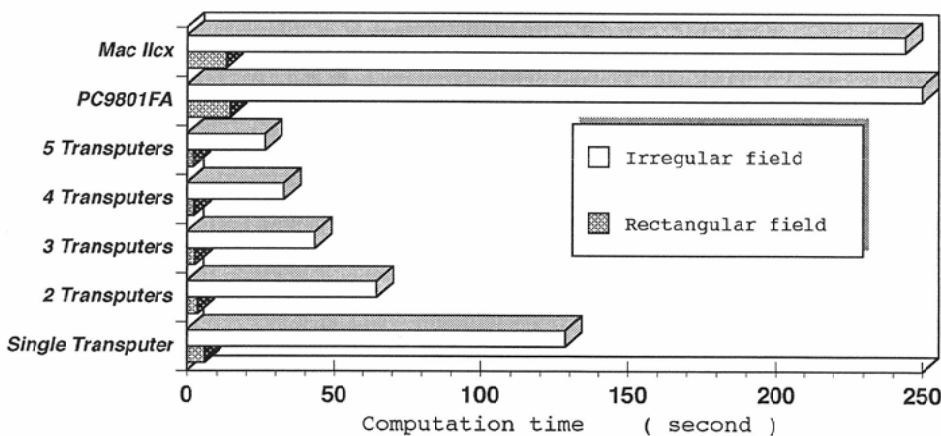


Fig. 4 Execution times of Transputers and other computers: Irregular and rectangular field calculations were performed on various hardware configuration. Computation time was reduced on the Transputer network as almost reverse proportion to the number of the CPU. IIcx (Macintosh IIcx) has a Motorola 68030 CPU running with 16MHz clock cycle and a floating point computation unit (FPU). PC9801FA has Intel 80486SX (16MHz) CPU and a FPU.

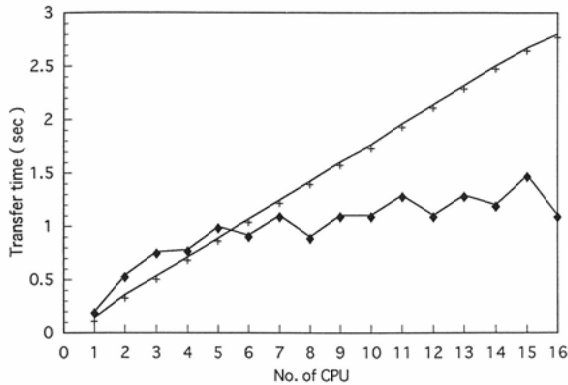


Fig. 5 Initial data transfer time of pipeline and binary-tree network: Initial data transfer time are shown for different number of processors by pipeline(+) binary-tree(◆) network configuration.

で割った、パケット 1 個当たりの計算時間は矩形照射野および不整形照射野計算でそれぞれ 0.29 および 3.4ms であった。参考のために、PC9801FA (80486SX クロック数 16MHz, 浮動小数演算装置付) と、Apple computer 社の Macintosh II cx (68030 16MHz, 浮動小数演算装置付) での計算時間をも示す。

2 分木状と線状ネットワーク構成での、初期デ

ータ転送時間の変化を比較した結果を Fig. 5 に示す。線状ネットワーク構成では、CPU 数の増加にほぼ比例して初期データ転送時間が増加している。一方、2 分木状構成では、CPU 数が少ない場合は線状ネットワーク構成より転送時間がかかるが、CPU 数が増加しても転送時間の増加が少なく、6 CPU 以上では線状ネットワーク構成より転送時間が短かった。なお、初期データ転送後に行う実線量計算時間は、両者で実質的な差はなかった。

なお、この実験は 1 CPU の上での模擬的マルチプロセッサ・システムに行っているため、実際にマルチプロセッサとした場合のデータ転送速度の違いを確認するために、1 CPU の上での模擬的マルチプロセッサ・システムにても、プロセス間通信に要した時間を測定した。しかしながら、特に異 CPU 間通信と 1 CPU の上でのプロセス間通信で実質上の転送速度の違いはなく、シミュレーションは妥当と思われた。

各 CPU 間の負荷分散の測定結果を Fig. 6 に示す。不整形照射野計算では、各 CPU の負荷はほぼ均等であった。矩形照射野計算では、ルート・トランスピュータで処理されたパケットは最も少

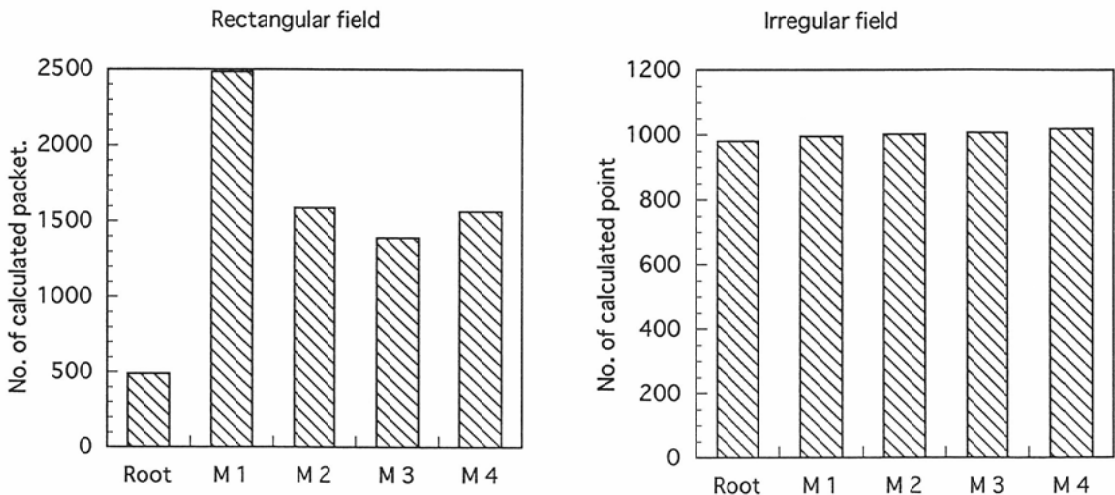


Fig. 6 Load sharing among processors

Root: Root processor, M1 to M4: Transputer modules. Number of calculation packets processed at each processor of the pipeline network of 5 CPU are shown. Left: Rectangular field calculation, total 7500 packets Right: Irregular field calculation, total 5000 packet.

なく、2番目のCPUで最も多かったが、以降のCPUではやや減少した結果であった。

## 考 察

3次元 non-coplanar の線量計算、特に radio-surgery などは3次的に配置した、多方向からのビームの組み合わせであるため<sup>8),9)</sup>、精度のよい線量分布を求めるためには十分な計算点を持つ必要がある、計算量が膨大となる。米国での3次元外照射治療計画の共同研究 (Photon Treatment Planning Collaborative Working Group) の報告<sup>10)</sup>では、典型的な3次元治療計画で総計算点は100,000から250,000に及ぶことがあり、radiological path-length法での線量計算で、VAX11/780を用いて1門当たり30分から1時間の計算時間となる、としている。また、3次的に散乱線を考慮したdSAR法、delta-volume法<sup>11)</sup>などで計算を行う場合には計算点当たりの計算量が激増し、計算時間があまりにも長くなるため、日常の治療計画には使用不可能である。近年のワークステーションなどのコンピュータの性能はかなり向上している。しかし、最近の治療計画装置には、精度とともに治療計画の変更を即時に線量分布として表示し、即座に計画を評価、変更できるリアルタイム性が求められており、これらの要求に合わせるためにはさらに、計算の高速化が必要である。

Unixなどのマルチタスク・オペレーティング・システムを使用するワークステーションでは、一連の処理をいくつかの処理単位(タスク)に分割する。これによって、外部記憶装置や入出力機器の待ち時間に他のタスク処理を行い、CPUの待ち時間を減らし、有効に使うことができる。しかし、単一CPUシステムである限りは、マルチタスク処理を行っても、同時に実行される処理は一つのみであり、CPU計算時間自体の改善にはならない。

複数のCPUが同時に平行して別々のタスクを処理する、並列マルチプロセッサ・システムは、汎用性を失うことなく全体としての計算時間を大

幅に短縮できる。この効果は、実行する処理の種類によって違う。順を追って逐次的に処理する必要のある計算では並列化の効果は比較的少ないが、並列実行可能な多数のタスクに分割し、各CPUに割り振ることのできるような処理では効果が大きい。放射線治療計画の線量計算では、多数の計算点で同様な計算を行うため、基本的に並列処理に向いているといわれている<sup>12)</sup>。

われわれの使用した、トランスピュータ T800は、単体での整数計算の速度は12.5MIPS (Million instructions per second)、浮動小数計算は1.9MFLOPS (Million floating point operations per second)の計算性能がある<sup>13)</sup>。4個の高速シリアルリンクポートをもち、これにより複数のCPUを接続してマルチプロセッサ・ネットワークを構成できる。また、タスク切り換えをハードウェアで行い、マルチタスク処理がオペレーティング・システムの援助によらずに行える。このため、単一CPU上でもマルチプロセッサ・ネットワークを、オペレーティング・システムによるオーバーヘッドなしに模擬することができる。

汎用のコンピュータにハードウェアを付加して、高速化を計る方法に、アレイ・プロセッサ、DSP (Digital Signal Processor) などがある。

アレイ・プロセッサは、配列の計算など、ベクトル化が可能な演算に関しては、飛躍的に処理速度を向上させるが、ソフトウェア開発がやや困難である<sup>12)</sup>。Convolution法<sup>13),14)</sup>などは専用のDSPによって大幅に計算を高速化できるが、システムの柔軟性が失われ、他のアルゴリズムへの転用が困難である。

また、専用のハードウェア (Fast reconstructor) を使い、線量計算の高速化を計ったシステムが実用化されている<sup>15)</sup>。これはEquivalent-TAR法<sup>16)</sup>を改良したModified-ETAR法<sup>17)</sup>などのアルゴリズムでも使用されて3次元計算を可能としている。

これらのシステムと比較した、われわれのシステムの特徴として、任意の数のCPUによって構成されるマルチCPUシステムであることが挙げられる。すなわち、ホストコンピュータは、主と

して、ディスプレイ表示などの入出力装置の管理を担当するのみであり、計算プログラム自体はネットワーク上の、多数のCPUが主体となって行うので、ホストコンピュータに依存しない。また、ネットワーク上のCPUは同一のものであるため、必要に応じてCPUを増やすことで性能が向上でき、計算能力の拡張性(Scalable performance)がある。この計算性能上の拡張性は並列システム特有の利点といえる。今回の実験でも、CPUの数にほぼ比例して計算能力の向上が確認された。

また、プログラム作成上の利点として、他の専用ハードウェアを使用する方式が、マイクロ・プログラム方式などを採用するため、特有の書式でハードウェアに依存した記述が必要であることが多い。それに対してわれわれのシステムは、すべての処理が高級言語であるParallel C言語またはParallel Fortranで記述できる。さらに、基本的にCPUの数やネットワーク形態によらず、プログラム本体は同一である点でも、本システムは、計算能力の拡張の点で柔軟性に富んでいるといえる。また、CPUの性能当たりの価格が比較的安く、モジュール単位で容易に追加が可能であり、場合によってはホストコンピュータやプログラムなどの変更なしに、より高性能なトランスペュータとも交換できる。

この、計算能力の拡張性、柔軟性は臨床的なシステムの運用上からも効果的である。治療計画システムの本来の目的である線量分布の最適化の観点から、高速な計算によるリアルタイム線量表示が重要であると指摘されている<sup>15)</sup>。本システムでは、より高い計算精度などのためアルゴリズムの変更があっても、ハードウェアに依存しないプログラム開発が容易である。また、しばしば計算量の多いそれらのアルゴリズムにおいても、CPUを追加し計算能力の拡張が可能であり、計算時間の延長を避け、リアルタイム線量表示を確保できる。

本研究では、外照射線量計算一般への並列処理による高速化の有効性を探るため、最も一般的なアルゴリズムである2法において、検討している

が、基本的に他のアルゴリズムでも問題なく適応可能である。後述のように、計算量の多いアルゴリズムほど、並列化による効率が優れていることも、リアルタイム表示維持に有利であろう。

一方で問題点として、(1)Parallel C言語は並列処理用の最適化を自動的には行わないため、プログラムをある程度書き換える必要がある、(2)マルチプロセッサ・システムでは計算の実行順序が不定のため、デバッグがやや困難である、などがある。これらの問題に対処するために、プログラム作成上の注意が必要である。

特に並列処理用に開発された言語として、Occam言語<sup>19)</sup>などはトランスペュータと特に整合性がよく、またデバッグ用の機能も整っている。しかし、今回は若干の変更で既存のプログラムを利用できる、Parallel C言語を用いた。自動並列化コンパイラは使用者がこれらの問題を意識することなしに、通常の逐次処理プログラムを自動的に並列化する。現段階では未完成な技術であるが、将来的には根本的解決の手段であろう。

実験での結果からは、初期データの転送に、CPU当たり20msを要することがいえる。しかし、初期データは計算開始前に送られ、その後は変更がない限り転送されないため、実際の治療計画の運用形態からして、計算時間の考慮には含める必要はないと思われる。

5台のCPUを用いた実験結果では、CPU数の増加にほぼ逆比例して、計算時間が短縮することが示されている。さらに詳細な比較のために、CPU数に完全に逆比例して計算時間が減少するとした場合の1CPU当たりの計算時間、すなわちオーバーヘッドがないと仮定した場合の時間と、実際の計算時間の差をFig. 7に示した。計算負荷の大きい場合(不整形照射野計算)も小さい場合(矩形照射野計算)もCPU数の増加によるCPU間転送時間のオーバーヘッドはあまり変わらない。矩形照射野および不整形照射野ともCPUが2台になると、約50msのオーバーヘッドが認められたが、3台以上では1台当たり約30msの増加であった。3台以上での増加率が比較的少ないのは、トランスペュータではCPU間



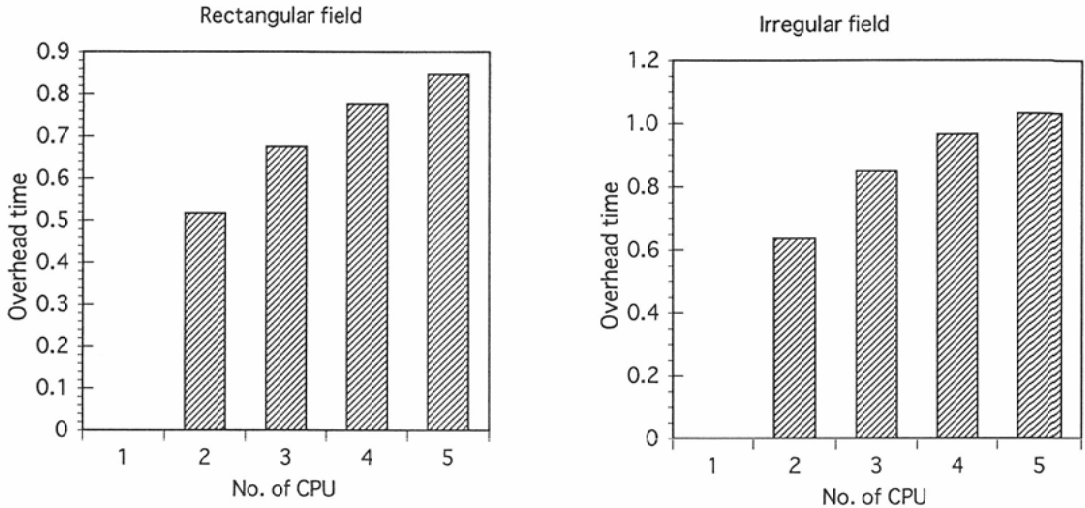


Fig. 7 Difference of actual and ideal calculation time depending on the number of CPU: Overhead time due to the trans-processor communication are presented. Ideal calculation time = (Calculation time by 1 CPU system)/(No. of CPU) Overhead time = (Actual calculation time)- (Ideal calculation time)

転送がそれぞれ独立しており、受信タスク、CPU本体、送信タスクが別個に動作するため、受信しながら並列に送信が行われるためと予想される。

マルチプロセッサの結合方法にはさまざまなネットワーク形態がある (Fig. 8)。木状ネットワーク結合、線状ネットワーク結合は基本的なものであり、今回の実験ではこれらで検討を行った。

木状ネットワークのすべての節までデータが達するまでの時間は、 $N$  を節の総数、 $b$  を一つの節の分岐の数 ( $b > 1$ ) とした場合、 $N$  が十分大きければ  $b$  を底とする  $N$  の対数に比例する<sup>20)</sup>。

$$t_i \propto b \cdot \log_b (N) \quad (1)$$

線状ネットワークは木状ネットワークの特殊な場合とみなされるが ( $b = 1$ )、すべての節までデータが達するまでの時間 ( $t_i$ ) はCPU数に比例する。

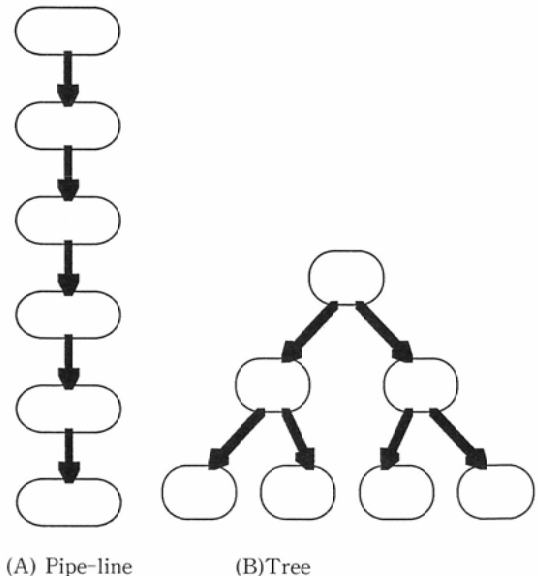
$$t_i \propto b \cdot N \quad (2)$$

一般に、節の数が少ない場合にはすべての節にデータが達するまでの時間は線状ネットワークが木状ネットワークより早い、ある程度以上に節数が増えると木状ネットワークの方が早い。また、1節当たりの分岐の数が増えると、節数が少ない場合にはデータ転送が終了するまでの時間が

長い、節数が多い場合には逆に有利となる。

たとえば、2分木の場合では  $N = 6$  以上では初期データ転送完了までの時間は線状ネットワークより早い。

初期データ転送時間を除く計算時間自体は、木状ネットワークと線状ネットワーク結合で実質的な差はなかった。理由として、本システムでは、



(A) Pipe-line

(B)Tree

Fig. 8 Network Topology

働いていないCPUに自動的に計算パケットが流入する機構となっており、また計算パケット転送時間は実計算時間に対して十分短いため、空CPUを待ってパケットの流入が定常状態となるためと予想される。

各CPUで処理したパケットの数からすると (Fig. 5) 不整形照射野の場合は各CPU間の負荷分散は良好であった。計算パケット当たりの計算量がある程度あれば、CPU空き時間はほとんどなく、オーバーヘッドは少ないといえる。

矩形照射野の場合は各CPU間の負荷分散にばらつきがあったが、計算総量が少ないため相対的に転送関連の処理量が増加しており、ルート・トランスピュータは計算以外の制御作業のため、処理可能パケット数が減少しているものと思われた。

CPUを増すことによる計算時間減少の利得と、CPU間転送時間のオーバーヘッドの増加による損失とを比較すると、CPU間転送時間に対する実計算時間の比が大きいほど利得が大きい。すなわち、計算点当たりの計算負荷が大きい計算アルゴリズムにおいて、CPU数増加の効果が大きい。このような計算アルゴリズムでは総計算量も多い。しかし、並列マルチプロセッサ・システムではCPU数を増加することにより、容易に総計算時間を短く維持できるため、臨床的な観点からも有用であるものと思われる。

一方、矩形照射野計算などの、計算点当たりの計算負荷が小さい計算アルゴリズムでは、たとえ多くのCPUがあっても、前述のように負荷分散が均等とならず、計算効率が悪い。しかし、負荷が少ない場合は当然のことながら、総計算時間が短くなるので、一般的に問題とならない。しかしながら radio-surgery などでは非常に計算点数が多くなり、パケット数も激増するため<sup>21),22)</sup>、計算効率の悪化による影響が大きい。また、Dose-volume histogram<sup>23)</sup>を求める際なども、多量の計算点を要す<sup>24)</sup>。パケットに割り振る処理単位を大きくして、1パケット当たりの負荷をある程度大きくすることが有利であると予想される。

実際に、CPU数をどの程度とするかは、臨床上の要求からどの程度の計算時間までなら許容さ

れるか、にもよるが、CPU間転送時間の増加による費用・効果比の観点からすれば、矩形照射野計算ならば、2, 3台で十分であり、また、不整形照射野計算では、50台以上としても、オーバーヘッドによる計算効率の低下は十分少なく、台数の増加による効果が期待される。ただし、初期データ転送などのために、数十台のCPUからなるシステムでは、末端までの転送時間の少ない、木状ネットワーク構造などとするべきであろうと思われる。

コンピュータの性能は向上しているが1CPUの性能向上には限界があり、究極的には並列処理に向かわざるを得ないと思われる。今回実験に用いたトランスピュータ T800 は、RISC プロセッサとしてはやや古い世代に属しているが、現在評価版が出荷されつつある T9000 は、今回使用した T800 の 10 倍以上の処理能力がある<sup>25)</sup>。また、Sun Microsystems 社も並列処理を意識した CPU である、Super SPAC などを開発している。これらの新世代の CPU を用いることにより、今後さらに並列処理システムを線量計算に用いる利点が増すものと思われる。

---

## ま と め

---

トランスピュータを用いた並列処理システムにて外照射線量計算を行い、問題点を検討した。トランスピュータを追加し、並列計算を行うことにより、ほぼ等比的に高速化可能であった。ネットワーク転送のオーバーヘッドは、初期データ転送時に CPU 当たり約 0.02 秒であった。初期データ転送が完了するまでの時間は、6CPU 以上では木状ネットワークが線状ネットワークよりも短かった。本計算前にデータ転送を行うので実際上はリアルタイム性に問題は少ないものと思われたが、構成 CPU 台数が多い場合にはネットワーク形態の検討が必要と思われた。

矩形照射では、50×50 計算点で、5CPU で 1 門当たり 1 秒以内で計算できた。不整形照射野線量計算では、50CPU 以上としても十分な計算効率が確保されるため、CPU 追加によって同程度以

下の計算時間が予測される。構成CPU台数は、リアルタイム性を考慮して変更ができるので、計算アルゴリズムの変更などによる計算量の増大にも容易に対処できる。リアルタイム線量表示が確保できることは臨床的観点からも特に重要である。

計算点当たりの計算負荷の少ない場合には、計算バケットの転送時間が相対的に増加し、また各CPUの負荷量も若干の偏りがあった。特に計算バケットが多い場合には、計算バケットの分割単位をまとめる、などが必要と思われる。

今回検討した並列処理システムでは、計算時間を要する複雑な計算アルゴリズムほど、効果を発揮する傾向がみられた。必要に応じてCPU数を増すことによって、容易に計算速度を向上できる並列処理システムは、3次元治療計画を十分な精度でリアルタイム表示可能であり、治療計画の最適化に有効であるものと思われる。

#### 文 献

- 1) Stern RL, Fraass BA, Gerhardtsson A, et al: Generation and use of measurement-based 3-D dose distributions for 3-D dose calculation verification. *Med Phys* 19: 165-73, 1992
- 2) Purdy JA, Wong JW, Harms WB, et al: State of the art of high energy photon treatment planning. *Front Radiat Ther Oncol* 21: 4-24, 1987
- 3) Cundiff J, Cunningham J, Golden R: A method for the calculation of dose in the radiation treatment of Hodgkin's disease. *Am J Roentgenol* 117: 30-44, 1971
- 4) 尾内能夫: 照射技術と線量計算, 放射線基礎医学 3, p. 46-199, 日本出版サービス, 東京, 1984
- 5) Clarkson J: A note on depth doses in fields of irregular shape. *Br J Radiol* 14: 265-268, 1941
- 6) Kunieda E, Ogawa K: An External Treatment planning system Installed on a Personal Computer. 9th ICCR proceed: 509-512, 1987
- 7) Parallel C Users Guide. 3L Ltd., Livingston, 1989
- 8) Flickinger JC, Lunsford LD, Wu A, et al: Treatment planning for gamma knife radiosurgery with multiple isocenters. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 18: 1495-501, 1990
- 9) Luxton G, Jozsef G, Astrahan MA: Algorithm for dosimetry of multiarc linear-accelerator stereotatic radiosurgery. *Med Phys* 18: 1211-21, 1991
- 10) Photon Treatment Planning Collaborative Working Group.: Three-dimensional dose calculations for radiation treatment planning. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 21: 25-36, 1991
- 11) Wong J, Henkelman R: A new approach to CT pixel-based photon dose calculations in heterogeneous media. *Med Phys* 10: 199, 1983
- 12) Photon Treatment Planning Collaborative Working Group: State-of-the-art of external photon beam radiation treatment planning. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 21: 9-23, 1991
- 13) Starkschall G: A convolution method for constructing primary beam profiles in the presence of beam modifiers. *Med Phys* 15: 657-61, 1988
- 14) Boyer AL, Wackwitz R, Mok EC: A comparison of the speeds of three convolution algorithms. *Med Phys* 15: 224-7, 1988
- 15) Matuoka A, Inamura K, Ueda Y, et. al: Visual optimization of external beam therapy by fast reconstructor of dose distribution. 7th ICCR proceed: 157-161, 1980.
- 16) Sontag MR, Cunningham JR: The equivalent tissue-air ratio method for making absorbed dose. *Radiology* 129: 787-794, 1978
- 17) 稲邑清也, 阿部駿介, 上田八寿男, 他: Modified Equivalent TAR法による3次元不均質補正線量分布高速演算, 放射線治療システム研究1: 103-111, 1984
- 18) Transputer architecture., Inmos, 1985.
- 19) Roscoe AW, Hoare CAR: The Laws of Occam Programming. Oxford University Computing Laboratory, 1986
- 20) 渡辺勝正: 並列プログラムの評価, 並列処理概説, 165-177, 東京, コロナ社, 1991
- 21) Pike B, Podgorsak EB, Peters TM, Pla C: Dose distributions in dynamic stereotactic radiosurgery. *Med Phys* 14: 780-9, 1987
- 22) Olsson LE, Arndt J, Fransson A, Nordell B: Three-dimensional dose mapping from gamma knife treatment using a dosimeter gel and MR-imaging. *Radiother Oncol* 24: 82-6, 1992
- 23) Chen GT, Pelizzari CA, Spelbring DR, Awan A: Evaluation of treatment plans using dose volume histograms. *Front Radiat Ther Oncol* 21: 44-55, 1987
- 24) Drzymala R: Dose-volume histograms. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 22: 71-78, 1991
- 25) The T9000 Transputer products overview manual., Inmos, 1991