

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第3588048号
(P3588048)

(45) 発行日 平成16年11月10日(2004.11.10)

(24) 登録日 平成16年8月20日(2004.8.20)

(51) Int. Cl.⁷

A 6 1 B 6/03

F I

A 6 1 B 6/03 3 2 1 Q

A 6 1 B 6/03 3 2 O Y

請求項の数 5 (全 34 頁)

(21) 出願番号	特願2000-501394 (P2000-501394)	(73) 特許権者	591200896
(86) (22) 出願日	平成10年6月11日 (1998.6.11)		アナログック コーポレーション
(65) 公表番号	特表2003-524430 (P2003-524430A)		アメリカ合衆国, O 1 9 6 O マサチュー
(43) 公表日	平成15年8月19日 (2003.8.19)		セッツ, ピーボディ, センテナリアル イン
(86) 国際出願番号	PCT/US1998/012055		ダストリアル パーク, センテナリアル ド
(87) 国際公開番号	W01999/001736		ライヴ 8
(87) 国際公開日	平成11年1月14日 (1999.1.14)	(74) 代理人	100064447
審査請求日	平成12年8月2日 (2000.8.2)		弁理士 岡部 正夫
(31) 優先権主張番号	60/051,409	(74) 代理人	100085176
(32) 優先日	平成9年7月1日 (1997.7.1)		弁理士 加藤 伸晃
(33) 優先権主張国	米国 (US)	(74) 代理人	100106703
			弁理士 産形 和央
		(74) 代理人	100096943
			弁理士 臼井 伸一

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 ヘリカルスキャン・立体的コンピュータ断層撮影システムのための改良検出器アレイ幾何学配列

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

オブジェクトの立体画像を再構成するコンピュータ断層撮影システムであって、ビーム軸を中心とした円錐ビームを該オブジェクトを通して検出器アレイに投射するエネルギーソースを備え、前記ソースおよび検出器アレイがオブジェクトに対して回転可能な関係にあり、前記オブジェクトおよびビームがビーム軸と垂直の並進軸に沿って相対的に並進するにしたがい、連続する視角で該オブジェクトに応答信号電波を発生させる前記システムにおいて、前記検出器アレイは、センサ素子アレイであり、前記センサ素子アレイは、前記ビームのパスに位置付けられた格子状のローおよびカラムに配列されていると共に、ビーム軸を中心として回転させられて、並進軸に対して傾斜角 α ($\alpha \neq 0$) だけ傾斜して配置 10 されており、前記カラムは、スキャン時、並進軸に対して傾斜角 α の位置にあり、この結果、前記センサ素子アレイのローは、並進軸に対して所定のピッチを有しており、 前記傾斜角 α は、前記オブジェクトおよびビームの相対的並進レートと、前記オブジェクトに対する前記ソースおよび検出器アレイの回転レートとの関数として決定され、 前記コンピュータ断層撮影システムは、前記検出器アレイを搭載し前記傾斜角 α の選択的調節を可能にするマウントをさらに備えている、 ことを特徴とするシステム。

【請求項 2】

請求項 1 記載のシステムにおいて、前記マウントはモータ駆動で前記傾斜角 α の範囲を選択することを特徴とするシステム。

【請求項 3】

請求項 1 記載のシステムにおいて、前記検出器アレイはプレーナー型であることを特徴とするシステム。

【請求項 4】

請求項 1 記載のシステムにおいて、前記検出器アレイが円筒面上に置かれるよう形作られていることを特徴とするシステム。

【請求項 5】

請求項 4 記載のシステムにおいて、前記円筒面は、前記ソースを通る軸を中心とした円周の円筒面であることを特徴とするシステム。

【発明の詳細な説明】

10

【0001】**【関連出願】**

本出願は、1997年7月1日付けで出願された米国仮特許出願60/051,409号の利点を主張する。その内容は引用によって本明細書の記載に援用する。

【0002】**【発明の背景】**

現代のコンピュータ断層撮影（CT）スキャナ・システムにおいては、X線のソースがX線ビームを発生し、それが物体（オブジェクト）の中を通過してセンサ・アレイの上に入射する。第三世代のCTシステムにおいて、これらソースおよびセンサ・アレイは物体の回りを回転するガントリ上に搭載されている。オブジェクトの連続する一連の投影がガントリ回転角の増分ごとに記録される。ガントリの半回転（「ハーフ・スキャン」システムの場合）または全回転（「フル・スキャン」システムの場合）の完了後、連続する回転角ごとのデータが、再構成として知られるプロセスによって組み合わせられ、オブジェクトの断層画像を生成する。静止スキャン構成においては、オブジェクトがスキャンごとに適所に固定されが、並進スキャン、あるいは「ヘリカル」スキャンにおいては、オブジェクトおよびガントリが回転スキャン中互いに相対的に並進し、システムのスループットを改善する。

20

【0003】

図1の従来技術に示すように、従来の二次元CTスキャナにおいては、ポイント・ソース54および一次元アレイ検出器素子53からなるセンサ・アレイ52間で、X線ビーム51が平坦な扇形形状50で伝播する。扇形ビーム50は「軸横断方向の扇形」と称される。なぜならば、その扇形の平面が回転軸、すなわち、z軸に対して直行しているからである。二次元画像再構成プロセスは各回転角における生データを収集し、ハーフ・スキャンまたはフルスキャンの後、それらデータを平坦なピクセル画像に変換する。すなわち、X線がオブジェクト55を通過した部分のピクセル画像を作る。また、各スキャンに続いてそのオブジェクトをz軸に沿って並進させ、物体55のそれぞれ隣接する平坦な断面画像、すなわち「スライス」を生じ、それらを組み合わせて立体的な画像を作り出すこともできる。

30

【0004】

図2の従来技術に示すように、三次元CTスキャナにおいては、「円錐ビーム」とも称される円錐形のX線ビーム61がポイント・ソース54で発生し、ビーム軸yに沿ってオブジェクト55を投射し、二次元センサ・アレイ63上に入射する。アレイ63は、円筒形の面58上にある複数のロー56（ロー1...M）および複数のカラム62（カラム1...M）の検出器からなる。この構成において、X線の円錐ビーム61は、xy平面に沿ってだけでなく、z軸に沿っても逸れ（広がり）を生じる。

40

【0005】

各円錐ビーム61は、複数層の軸横断方向扇形ビームから構成され、そのうちの三つが番号60A、60B、60Cによって図示されている。各軸横断方向のビームは、X線のポイント・ソース54と、ロー1...Mの検出器素子56A、56B、56Cの一つとの間にその範囲が定められる。なお、xy平面に沿って存在している軸横断方向扇形ビーム

50

60Bを除いて、60A、60C等残りの軸横断方向扇形ビームは回転のz軸に対して直行しておらず、したがって、最も厳密な意味では「軸横断方向」ではない。それどころか、60A、60C等、残りの扇形ビームのいずれもが、従来技術の図3に示すように、「円錐角度」と称される小さな角度 β だけxy平面に対して相対的に傾いている。この定義範囲内で、xy平面に沿って投影される軸横断方向扇形ビーム60Bは、円錐角度が 0° の軸横断方向扇形ビームと考えることができる。

【0006】

X線のポイント・ソース54およびカラム1-Nの検出器素子62も「軸方向の」扇形ビームの範囲を定め、そのうちの三つが、従来技術の図4に図示されるように、番号64A、64B、64Cによって表される。各軸方向扇形ビーム64は、回転軸に平行な平面上にある。ここでは、xy平面一直線上にあり、したがって、どの回転角度でも、z軸を通して投影される検出器カラム j_0 の扇形ビーム64Bを除いて、残りのカラム1...Nの軸方向扇形形状は、xy平面から「軸方向角度」 γ だけ逸れている。yz平面に沿って投影される中央の軸方向扇形ビーム64Bは、軸方向の角度 γ が 0° の軸方向扇形ビームと考えることができる。そして、回転中に、複数の連続ガントリ回転角の各角度ごとに一組の線投影が与えられる。xy平面上で測定された線投影の角度は、その投影の視角と称される。このように、回転角 θ においては、軸方向の角度 γ における各軸方向扇形ビーム範囲内の線投影が、 $\phi = \theta + \gamma$ の同一視角と関連付けられる。

実際、従来の二次元再構成アルゴリズムは、二次元検出器アレイで収集された円錐ビームのデータから三次元の立体画像を再構成するには不十分である。上述したように、各軸横断方向扇形ビームがz軸に対して円錐角度 β ごとに存在するので、二次元再構成へと導くべく、三次元の円錐ビームデータをz軸に沿って独立した平行層に正確に分解することができない。したがって、このデータを使って二次元再構成を行うと、xy平面に沿った中央の扇形ビーム60Bを除いて、扇形ビームデータの各組に再構成誤差が生じる。その再構成誤差は、円錐角度 β が増大するにつれ悪化する。より正確な三次元再構成法として、静止スキャン構成のための円錐ビーム再構成法として知られる手法が以下の文献に記載されている。

L. A. フェルトカンプ (Feldkamp)、L. C. ディビス (Davis) および J. W. クレス (Kress) の “Practical Cone-beam Algorithm” (実用円錐ビームアルゴリズム) J. Opt. Soc. Am. A, 第一巻、6号、612頁、1984年7月。上記論文は、z軸に対して静止しているオブジェクトをスキャンする場合に適用される。ヘリカル・スキャンとして知られる他の形式のスキャンにおいては、オブジェクトおよびガントリが、ガントリ回転中、通常z軸と平行な並進軸に沿って一定速度で相対的に並進する（一般的に、オブジェクトをガントリに対して並進させる）。オブジェクトからは、X線のソースおよびセンサが、データ収集時のヘリカル軌跡において、そのオブジェクトの回りを巡回しているように見える。単独ローの検出器を備えた従来システムのヘリカル・スキャンにおいては、投影データが、先ず最初に、その平坦画像を生じる各スライスのz位置に対して補間される。これら平坦画像はz軸に沿って隣接した位置に置かれる。そして、隣接したスライスが組み合わせられ、各種モードの三次元表示のためにさらに処理される。あいにくなことに、円錐ビームシステムにおいては、z軸の並進によって、収集されたデータが標準の二次元または三次元の再構成法に必要なデータからさらにずれを生じる。その結果、円錐ビームシステムのヘリカル・スキャンから生じる再構成誤差は、静止型のスキャンの場合よりも悪くなる。円錐ビームのヘリカル・スキャンのための再構成および強調法は以下の文献に記述されている。

【0007】

A. H. フォー (Foh) に対して1994年3月1日付けで発行された、米国特許第5,291,402号 “Helical Scanning Computed Tomography Apparatus” (ヘリカルスキャン・コンピュータ断層撮影装置)。

【0008】

10

20

30

40

50

H. フー (Hu) に対して1994年12月27日付けで発行された、米国特許第5, 377, 2505号“Reconstruction Method for Helical Scanning Computed Tomography Apparatus with Multi-row Detector Array”(複数ローの検出器アレイを備えたヘリカルスキャン・コンピュータ断層撮影装置のための再構成方法)。

【0009】

H. フー (Hu)、N. J. ペレ (Pelle) およびH. フォー (Pföh) に対して1995年7月4日付けで発行された、米国特許第5, 430, 783号“Reconstruction Method for Helical Scanning Computed Tomography Apparatus with Multi-row Detector Array Employing Overlapping Beams”(重複ビームを用いる複数ローの検出器アレイを備えたヘリカルスキャン・コンピュータ断層撮影装置のための再構成方法)。

【0010】

D. L. パーカー (Parker) “Optimal Short Scan Convolution Reconstruction for Fan Beam CT”(扇形ビームCTのための最適ショートスキャン・コンボリューション再構成)、Med. Phys., 第9巻、2号、254頁、1982年3/4月。

【0011】

上記参考文献において、データはガントリのフル回転にわたって、すなわち、「フル・スキャン」で収集され、スキャンされた領域に対して立体画像を再構成する。一方、ガントリ半回転、すなわち「ハーフ・スキャン」において収集されたデータに基づいて画像を再構成してもよい。ハーフ・スキャンの画像化は、フル・スキャンの場合と比べ、スループットレート、すなわち「ピッチ」が二倍になるという利点がある。ここで、「ピッチ」とは、ガントリの全回転の間にz軸に沿ってオブジェクトが並進する範囲を表している。静止型の円錐ビームシステムにおいて、フル・スキャンの再構成法は、ハーフ・スキャンの再構成法と比べて一般に優れた画像を提供する。これは、従来技術の図5で概略を示すように、フル・スキャンにおいては、視角 ϕ および $\phi + \pi$ のそれぞれにおける軸方向扇形ビーム66、68が反対方向に広がるためである。そのため、そのデータを相互に反対向きの他の視野からのデータと並べ替える場合、再構成の誤差をある程度打ち消すのに役立つ。その一方、ハーフ・スキャンの各視角 ϕ において、該オブジェクトの同一領域の反対側の視野を示す視角 $\phi + \pi$ に対応する扇形ビーム68が存在しない。

【0012】

従来技術の図5Bに示すようなヘリカル・スキャンにおいて、視角 ϕ および $\phi + \pi$ でそれぞれ対向する軸方向扇形ビーム66、68は、同じz位置に対応していない。その結果、ヘリカル型フル・スキャンは静止型のフル・スキャンの場合よりも再構成時に大きな誤差を持つ。フル・スキャンおよびハーフ・スキャンの円錐ビームシステムのいずれにおいても、軸方向のX線ビームの逸れ(広がり)が増大するにつれて再構成誤差も増加する。増設検出器ロー56を使用する場合、あるいは各ローの幅を拡大した場合、円錐角 β が拡大し、その結果再構成誤差がさらに過酷なものとなる。

【0013】

【発明の概要】

本発明は、従来技術の制限を克服する円錐ビーム再構成のための改良方法および装置に向けられたものであり、改良検出器アレイ構成がより好ましい幾何学配列で提供され、円錐ビーム再構成時に取得データを効率的に利用できるようにする。

【0014】

第一の様態において、本発明は、物体(オブジェクト)の立体画像を再構成するコンピュータ断層撮影システムを構成し、該システムは、ビーム軸を中心とした円錐ビームを該オブジェクトを通して検出器アレイに投射するエネルギーソースを備える。ソースおよび検出器アレイはオブジェクトに対して回転可能な関係にあり、オブジェクトおよびビー

10

20

30

40

50

ムがビーム軸と垂直の並進軸に沿って相対的に並進するにしたがい、連続する視角でオブジェクトに応答信号電波を発生させる。検出器アレイは、ビームパスに位置する格子状のローおよびカラムに配列され、ビーム軸回りを傾斜角 α ($\alpha \neq 0$) で回転するセンサ素子アレイである。このように、カラムは、スキャン時、並進軸に対して傾斜角 α ($\alpha \neq 0$) の位置にある。

【0015】

好適実施形態において、該傾斜角 α はオブジェクトの相対的並進レートの関数として、あるいはオブジェクトに対するソースおよび検出器アレイの回転レートの関数として求められる。好適な実施形態は、検出器アレイを搭載し傾斜角 α の選択的調節を可能にするマウントをさらに備える。該マウントは、モータ駆動で傾斜角 α の範囲を選択するものが好ましい。検出器アレイはプレーナーアレイであるか、あるいは、ソースを通る軸を中心とした円筒面上に位置するよう形作られる。

10

【0016】

第二の様態において、本発明は、物体（オブジェクト）の立体画像を再構成するコンピュータ断層撮影システムに使用される改良検出器アレイを構成する。該システムは、ビーム軸を中心とした円錐ビームを該オブジェクトを通して検出器アレイに投射するエネルギーソースを備える。ソースおよび検出器アレイはオブジェクトに対して回転可能な関係にあり、オブジェクトおよびビームがビーム軸と垂直の並進軸に沿って相対的に並進するにしたがい、連続する視角でオブジェクトに応答信号電波を発生させる。改良検出器アレイは格子状のローおよびカラムに配列される。そして、マウントが、ビーム軸に対して可変の傾斜角 α で検出器アレイをビームパスに位置づけ、スキャン時、カラムが並進軸に対して傾斜角 α の位置にくるようにする。好適実施形態において、該傾斜角 α は -5 度から $+5$ 度の間で可変である。

20

【0017】

第三の様態において、本発明は、物体（オブジェクト）の立体画像を再構成するコンピュータ断層撮影システムに使用される検出器アレイを構成する。該システムは、オブジェクトに対してアレイと回転可能な関係にあり、オブジェクトおよびソースが回転平面と垂直の並進軸に沿って相対的に並進するにしたがい、連続する視角でオブジェクトに応答信号電波を発生させるソースを備える。検出器アレイはローおよびカラムに配列された検出器素子の二次元アレイであり、並進軸に対して非対称の形状からなる。

30

【0018】

第一の好適実施形態において、素子が互いに直交関係となるよう検出器カラムは検出器ローに直交している。この構成においては、トップローおよびボトムローの検出器素子がアレイの逆コーナーで部分的に過疎化および／または過密化され、実質ヘリカル輪郭を有するアレイを提供する。

【0019】

第二の好適実施形態において、アレイの各検出器カラムの位置を中心カラムに対して ΔZ 量ずつ並進軸に沿って移動させる。 ΔZ は、システムピッチによって、あるいは $(j - j_0) * \delta * D * R / (\pi * r)$ によって求められる。ここで、 j はカラム番号、 j_0 は中心カラム番号、 δ はロー間の角度間隔、 D はシステム回転角 π の並進距離、 R はX線ソースから検出器アレイへの放射距離、 r はX線ソースから回転中心への放射距離である。

40

【0020】

第三の好適実施形態において、検出器カラムの一部分の集合の素子が中心カラムの素子に対して並進軸に沿って引き延ばされる（離隔される）。ここで、中心カラムまでの距離が拡大するにつれ、該検出器素子を漸近的に離隔するようにしてもよい。

【0021】

上記実施形態の各々において、検出器アレイのカラムおよびローの素子は円筒面上に位置していてもよい。またその代わりに、カラムおよびソース間の距離を検出器アレイの中心カラムに対するカラム位置の関数として徐々に縮小してもよい。

【0022】

50

本発明は、“Method and Apparatus for Reconstructing Volumetric Images in a Helical Scanning Computed Tomography system with Multiple Rows of Detectors”（複数ローの検出器を備えたヘリカルスキャン・コンピュータ断層撮影システムにおける立体画像の再構成方法および装置）と題し、1998年3月11日に出願され、ここに参照として援用される米国特許出願09/038,320号に記載され、「一定 z 補間」と称する再構成手法を利用するシステムに適用可能である。さらに本発明は、“Reconstruction of Volumetric Images by Successive Approximation in Cone-beam Computed Tomography Systems”（円錐ビーム・コンピュータ断層撮影システムの連続近似法による立体画像の再構成）と題し、1998年4月24日に出願され、ここに参照として援用される米国特許出願09/066,494号に記載され、「連続近似法」と称する改善された再構成手法にも適用可能である。

10

【0023】

【好適実施形態の詳細説明】

I. 概要

従来の静止型、単一ロー検出器、ハーフスキャン・コンピュータ断層撮影システムにおいて、正確な再構成に要する軸横断方向扇形ビームデータは、ハーフ・スキャン回転角 π 、プラス追加の角度 $2\gamma_{max}$ の範囲内にある。追加の角度とは、上述したパーカーの文献に記載されたように、扇形ビームの角度スパンである。余分な $2\gamma_{max}$ 角がなければ、回転角 θ を開始する、あるいは回転角 $\theta + \pi$ を終了する近辺で投影が欠けたり、冗長（二重サンプリング）になったりする投影がでてくる。この余分な $2\gamma_{max}$ スキャン角が、開始角および終了角近辺の再構成で投影の欠けを確実になくす。これら二重にサンプリングされたデータに対し、開始角 θ における扇形左側の各投影は、対向角度 $\theta + \pi$ における扇形右側の平行投影と対にされ、オブジェクトを貫く同一パスに沿って、反対方向に投影される。この冗長度は、反対向きの投影を平均化する適切な重み付けを適用することにより相殺され、すべてのデータが利用されるにもかかわらず、開始および終了角間の不連続性が最小限にとどめられる。

20

【0024】

この現象は、複数ローの検出器を備えた円錐ビームシステムのヘリカル・スキャンにおいてはずっと複雑になり、一对の各冗長投影は異なるローの検出器から収集される。 z 次元を無視した xy 空間において投影は平行であるが、異なるローの検出器は異なる円錐角 β を有しているので、これら投影も z 軸に対して相対的に異なる角度を持つ。このため、円錐ビームシステムにおいて冗長投影を重み付けして相殺する手法は、単一ロー検出器を備えた従来システムものと比べてほとんど効果を奏しない。さらに、スキャンされたオブジェクトに対する X 線の広がり比が第一および第二のハーフ回転間で対称をなす静止フル・スキャンと異なり、円錐ビーム・ヘリカル型ハーフ・スキャンはそのような対称性を欠いている。

30

本発明は、ヘリカル型ハーフ・スキャンで収集されたデータに対して改善された円錐ビーム再構成法の必要性に焦点をあてたものである。この新規手法は、扇形ビーム再構成アルゴリズムの悪影響を回避し、より正確な三次元画像を生成する。また、 xy 空間で平行ビーム背景映写を利用することにより演算量も削減する。

40

【0025】

本発明の改善された手法において、収集されたデータは、各検出器で検出した信号強度の対数関数として、先ず投影に変換され、オフセット非線形性に対して必要な修正を適用すると共に、公知のコンピュータ断層撮影法に従う他の修正も行う。隣り合う回転角から、図6に示すように、（検出器ローごとの）円錐ビームの投影が平行ビーム投影 $R_{ij}(\phi)$ にリオーダされる。そして、平行ビームの視角 ϕ ごとに、リオーダされた投影が xy 空間で互いに平行になる。しかしながら、投影 $R_{ij}(\phi)$ は異なる円錐ビームの回転角か

50

らリオーダされているので、視角 ϕ 範囲内の平行ビーム投影は、 z 軸、すなわち並進軸の方向に並進されるオブジェクトに対して異なる z 位置にある。これを補正すべく、本発明は、検出器アレイにおいてローは異なっても同一検出器カラムやチャンネルに由来する投影を、ここに「一定 z 補間」と称されるプロセスで一定 z 位置に補間する。

【0026】

一定 z 位置に補間された平行ビーム投影は、ローごとに等角間隔でサンプリングされる。フィルタリングされた背景映写に備え、各検出器からの投影は等しい空間間隔に補間される。そして、これら等間隔の投影に対し、平行ビーム投影からの二次元画像を再構成する畳み込みと同様の方法で、各検出器ごとの合成核によってフィルタ処理が施される。

【0027】

再構成の最終段階において、畳み込まれた平行ビーム投影は三次元背景映写法によって背景映写される。好ましい構成においては、 ϕ の値ごとに、平行ビームの視角 ϕ および $\phi + \pi$ における全てのローの投影が一つにグループ化され、これらスキャンされたボクセルに対して背景映写がなされる。各ボクセルは、視角 ϕ または $\phi + \pi$ のいずれかで該ボクセルを通過する畳み込み投影から背景映写される。ボクセルは正確な投影パスに位置していないので、ボクセルに対する背景映写の値は隣接する投影から補間される。

【0028】

以下の説明においては、ポイントソースから二次元アレイの検出器に円錐ビームが送出されると仮定する。また、ソースを通る軸を中心とした円筒面上に検出器アレイがあり、検出器カラムは回転軸、すなわち z 軸と平行で、 x y 平面には垂直であると仮定する。本発明は、他のあらゆるヘリカル・スキャンの幾何学配列にも同じく適用できるが、以下、図解上、上記前提を当てはめる。なお、本発明の目的上、用語「チャンネル」は既定ロー検出器の中のある検出器素子を示し、用語「カラム」は、隣接する検出器ローにおける、すなわち回転軸と平行な一列のチャンネル（または素子）の配列を示す。

【0029】

1.1. 扇形から平行ビームへの投影リオーダ

次に、検出器のローごとに収集された扇形ビーム投影を他のローから独立した平行ビーム投影にリオーダする初期ステップを、各種図面に関して詳細に説明する。ここで、 $P_{ij}(\phi)$ は、 j 番目カラムおよび i 番目ローに位置する検出器から円錐ビーム回転角 θ で得られた線投影の広がりを表し、 $R_{ij}(\phi)$ は、平行ビーム視角 ϕ でリオーダされた i 番目ローの j 番目カラムにおけるリオーダ投影の広がりを表すとすると次式が得られる。

【0030】

【数1】

$$R_{ij}(\phi) = P_{ij}(\phi - (j - j_0) * \delta) \quad (1)$$

ここで、 δ は隣接カラム間の角度間隔を表し、 j_0 は中心カラムを表す。検出器アレイが M 列のローを有し、ローごとに N 列のカラム、すなわち N 個の検出器チャンネルを有するとすると、

【数2】

$$i = 1, 2, \dots, M$$

$$j = 1, 2, \dots, N$$

$$j_0 = (N+1)/2 \quad (2)$$

検出器アレイ63（図7参照）が回転軸に対して対称をなしていると仮定する。軸横断方向扇形の扇形角は $2\gamma_{max}$ であるから、角度間隔 δ は下記式によって扇形角と関係づけられる。

【数3】

10

20

30

40

$$\delta = 2\gamma_{\max} / (N-1) \quad (3)$$

スキャン時、ガントリがz軸回りを回転し、以下のガントリ回転角の連続間隔でデータを収集する。

【数4】

$$\theta = \theta_k = k * \Delta\theta \quad (4)$$

ここで、kは整数、 $\Delta\theta$ は連続する扇形ビーム投影間のガントリ回転角の増分である。

【0031】

平行ビームの視角 ϕ として、同一回転角の増分 $\Delta\theta$ を有するものが適宜選択されたとすると、 $\phi = \phi_m = m * \Delta\theta$ となる。ここで整数mは0, 1, 2, ...。そして、増加する回転角がカラム間の角度間隔と等価となるようなレート、すなわち $\Delta\theta = \delta$ でデータを取得すると、式1は以下のようになる。

【数5】

$$R_{ij}(\phi) = P_{ij}((m+j_0-j)*\Delta\theta) = P_{ij}(\theta_k) \quad (5)$$

ここで、 $k = m + j_0 - j$

式5において、 $(m + j_0 - j)$ は整数なので、リオーダ投影 $R_{ij}(\phi)$ は、連続する扇形ビームの回転角で $P_{ij}(\theta_k)$ から得られる。

【0032】

連続する扇形ビーム投影の増加回転角がカラム角度間隔よりも大きい場合、すなわち $\Delta\theta > \delta$ または $\Delta\theta > a * \delta$ 、ここで $a > 1$ の場合、式1は以下のようになる。

【数6】

$$R_{ij}(\phi) = P_{ij}((m+(j_0-j)/a)*\Delta\theta) = P_{ij}(\theta_{k_a}),$$

$$k_a = m + (j_0 - j)/a \quad (6)$$

この場合、 $(j_0 - j)$ がaで割り切れないなら k_a は整数ではない。

【0033】

$k \leq k_a < k + 1$ ならば、ここでkは k_a の切り捨て整数で、 $f = k_a - k$ の残である。これにより下記式が与えられる。

【数7】

$$\theta_{k_a} = \theta_k + f * \Delta\theta \quad \text{with } 0 \leq f < 1 \quad (7)$$

式6および式7を組み合わせると、リオーダ投影 $R_{ij}(\phi)$ が以下のように算出される。

【数8】

$$R_{ij}(\phi) = (1.0-f) * P_{ij}(\theta_k) + f * P_{ij}(\theta_{k+1}) \quad (8)$$

これは線補間が用いられた場合である。これより、式8は、増加回転角がカラム角度間隔より大きい場合、すなわち $\Delta\theta > \delta$ の場合のシステムにおけるリオーダ投影 $R_{ij}(\phi)$ の偏差に当てはまる。一方、式5は双方が等しい場合、すなわち $\Delta\theta = \delta$ の場合に当てはまる。

【0034】

III. 一定z補間

視角 ϕ の全てのチャンネルjに対して図6に示すように、結果として得られたリオーダ投影

10

20

30

40

50

$R_{ij}(\phi)$ は同一ロー i の検出器から得られたので、互いに平行となるが、他のロー i' からのリオーダ投影 $R_{ij}(\phi)$ とは平行にならない。なぜならば、ロー i および i' 間の円錐角が異なるからである。さらに、ヘリカル・スキャンでは、各投影が異なる z 位置で同一検出器の扇形ビームからリオーダされるので、 z 軸沿いのリオーダ投影ロケーションはカラムに依存する。背景映写プロセスの先駆けとして後で行われる畳み込み処理の正確さを期すため、リオーダ投影は畳み込みに選択されるスライスの平面上、あるいはほぼその平面上になければならない。このため、 xy 空間においては平行だが z 位置では著しく離れているロー i のリオーダ投影 $R_{ij}(\phi)$ は、 xy 空間ではなお平行であるが、再構成スライスの一定 z 位置における投影組に補間、すなわち再サンプリングされる。

【0035】

10

本発明の次のステップ、一定 z 補間と称されるプロセスでは、同一カラム範囲内のリオーダ投影 $R_{ij}(\phi)$ を用いて一定 z 位置で投影を生じるので、畳み込み処理に適している。一定 z 補間の後、全てのカラムの補間されたリオーダ投影は、正確には z 軸と垂直ではないが（すなわち、それらの円錐角が変わるが）、視角 ϕ ごとに各補間ロー i の一定 z 位置にきっちりと対応付けされる。

【0036】

中央ローの検出器 i_0 に対応する投影パスを除いて、 z 軸と正確に直交する投影パスはない。そのため、各投影の z 座標は、ソースおよび検出器素子間のそのパスに沿って変化する。ここで、投影パスの「中点」として称される基準点はその投影の z 位置を表すものとして選択される。「中点」は投影パスと、該投影パスに直交し z 軸を横切る平面（あるいは、より厳密に言えば、 z 軸を通る平面と、該投影を含む軸方向扇形と直交する平面）とが交差する点として定義される。なお、投影線の中点は、必ずしもソースおよび検出器間の途中にあるとは限らず、また回転軸と一致するとも限らない。中点の z 座標は投影パスの z 位置を決める。同一軸方向扇形、すなわち同一カラムの投影中点は z 軸と平行な線に沿って存在するが、軸横断方向扇形、すなわち同一ローの投影中点は円弧からわずかに逸れた曲線上に存在する。

20

【0037】

軸横断方向扇形上の中点軌跡を図7に示し、検出器ロー84の検出器チャンネル1...Nに対応して $c_1 \dots c_N$ と印を付ける。次に、中点 $c_1 \dots c_N$ の平面図を図8に示す。ここでは、 A_j 等の投影パスが、 xy 平面と直交する軸方向扇形の中央ローの検出器から得られる。検出器カラム j を一例として用いると、 c_j が投影パス A_j の中点であり、 b_j がX線ソースを中心とし z 軸を横切る円弧83上に存在している。中央検出器カラム j_0 の投影 A_{j_0} に対し、中点 c_{j_0} が円弧83と交差し、回転中心 O と一致する。他の検出チャンネルに対しては、X線ソース82から中点 c_j までの距離 a_j が円弧83の半径よりやや短くなる。距離 a_j は以下のように表される。

30

【数9】

$$a_j = r * \cos(\gamma) = r * \cos((j - j_0) * \delta) \quad (9)$$

ここで、 j_0 は中央検出器カラム番号であり、 δ は、先に定義したように角度間隔を表す。

40

【0038】

j 番目の軸方向扇形からの中点の軌跡を xy 平面上図9に示す。投影パス A_{ij} の中点 c_{ij} 、およびその対応 z 座標 Z_{ij} を示すと共に、インデックス i がロー1...Mの内 i 番目の検出器ローの投影を示す。図8の b_j に対応する点を b_{ij} として示し、その z 座標が h_{ij} である。ここで、X線ソースを中心とする円筒形検出器アレイ63を想定すると、検出器アレイ63の放射距離およびX線ソースから回転中心 O への放射距離がそれぞれ R および r と称せられる。また、 i 番目検出器ローの z 軸位置を H とすると、図9の b_{ij} の z 座標は以下のように算出される。

【数10】

$$h_{ij} = H_i * r / R = h_i \quad (10)$$

これは、同一ロー範囲内の検出器チャンネル全てに対して同じでなので、インデックス j は省略可能である。隣接する検出器ロー間の空間間隔を ΔH で表すなら、連続するロー間の z 座標増分 h_{ij} は以下の通りである。

【数 1 1】

$$\Delta h = \Delta H * r / R \quad (11)$$

それゆえ、点 b_{ij} の z 座標 h_{ij} は下記の通り表すことができる。

【数 1 2】

$$h_{ij} = h_i = (i - i_0) * \Delta h \quad (12)$$

ここで、 i_0 は中央ロー番号である。

【0 0 3 9】

図 9 の幾何学配列から、中点 c_{ij} の z 座標 Z_{ij} は、 h_{ij} に対して、半径 r への距離 a_i の比として計算できる。

【数 1 3】

$$z_{ij} = h_{ij} * a_j / r \quad (13)$$

ヘリカル・スキャンのピッチ $2D$ と等価のガントリ回転角 π の間に、オブジェクトを距離 D 分並進させるなら、扇形ビーム投影 $P_{ij}(\theta)$ の z 位置は 20

【数 1 4】

$$z_{ij}(\theta) = z_{ij} + \theta * D / \pi \quad (14)$$

ここで、 θ は回転角を表す。

【0 0 4 0】

式 1 2 および 1 4 を組み合わせると、

【数 1 5】

$$z_{ij}(\theta) = (i - i_0) * \Delta h * a_j / r + \theta * D / \pi \quad (15)$$

式 1 の $\theta = \phi - (j - j_0) * \delta$ の関係を用いると、リオーダ平行ビーム投影 $R_{ij}(\phi)$ の z 位置 $z_{ij}(\phi)$ が以下のように記される。

【数 1 6】

$$z_{ij}(\phi) = (i - i_0) * \Delta h * a_j / r + (\phi - (j - j_0) * \delta) * D / \pi \quad (16)$$

上記式 1 6 で各投影パスに与えられた z 位置に関して、補間された投影 $S_{ij}(\phi)$ がローごとに一定の z 位置を有するよう、リオーダ投影 $R_{ij}(\phi)$ を z 方向に沿って隣接ローから補間することができる。一定 z 位置が中央カラム j_0 の z 位置と等しいものが選ば 40
れるとすると、

【数 1 7】

$$z_{j_0}(\phi) = (i - i_0) * \Delta h + \phi * D / \pi \quad (17)$$

ここで、中央カラム j_0 に対して、 $a_j = a_{j_0}$ および $j = j_0$ である。

【0 0 4 1】

この z 位置に関して、 i' をカラム j において対応するロー番号とすると、式 1 6 および 1 7 を組み合わせると、

【数 1 8】

$$(i' - i_0) \Delta h \cdot a_j / r + (\phi - (j - j_0) \delta) D / \pi = (i - i_0) \Delta h + \phi D / \pi$$

又は、

$$i' = i + (j - j_0) \delta D r / (\Delta h \cdot a_j \cdot \pi) \quad (18)$$

ここで、 a_j は式 9 によって与えられる。なお、式 18 は平行ビーム角 ϕ に依存しないので、投影は各視角ごとに変わることなく同じ方法で補間される。

【0042】

通常、 i' は整数ではない。 k を i' の切り捨て整数とする。すなわち、

10

【数19】

$$i' = k + f_k \quad (19)$$

ここで、 $0 \leq f_k < 1.0$ 。線形補間を用いるなら、一定 z 補間された投影 S_{ij} (ϕ) をリオーダ投影の二つの隣接ロー k および $k+1$ から以下のように求められる。

【数20】

$$S_{ij}(\phi) = (1.0 - f_k) \cdot R_{kj}(\phi) + f_k \cdot R_{k+1,j}(\phi) \quad (20)$$

S_{ij} (ϕ) の算出にあたって、より上位の補間方法がより正確な結果を得るために望まれる。

20

【0043】

各ローの一定 z 補間された投影 S_{ij} (ϕ) は、 xy 空間において一定 z 位置の平行ビーム投影に相当するが、円錐角 β が投影ごとに異なるので、三次元空間では真に平行にはならず、投影パスおよび xy 平面間の角度 β に関係する。中央検出器カラム j_0 の円錐角 β_{ij} および検出器ロー i の j 番目検出器カラムとを図解する図 10A および 10B に示すように、各投影 S_{ij} (ϕ) の円錐角は元の幾何学配列に戻ることににより得られる。

【0044】

h_i および r に換算すると、

【数21】

$$\beta_i = \tan^{-1}(h_i/r). \quad (21)$$

30

円錐角 β は、同一軸横断方向の扇形範囲内で、元の円錐ビーム投影 i_j のチャンネル全てに対して同一となる。なぜならば、 $h_{ij} = h_{ij_0} = h_i$ 。

【0045】

各ローのリオーダ平行ビーム投影 R_{ij} は同一ローの円錐ビーム投影 P_{ij} から異なる回転角 θ でリオーダされるので、各々同一円錐角 β_i を有する。ここで、式 12 および 21 を組み合わせると、

【数22】

$$\beta_i = \tan^{-1}((i - i_0) \Delta h / r) \quad (22)$$

40

【0046】

また、一定 z 補間された投影 S_{ij} (ϕ) は平行ビーム投影 R_{ij} (ϕ) から補間される。ここで、 i' はチャンネル j に左右される。そのため、 S_{ij} (ϕ) の円錐角 β_{ij} は、ロー番号 i だけでなくカラム番号 j によっても変化する。 i 番目ローの j 番目カラムの場合、 S_{ij} (ϕ) の円錐角は

【数23】

$$\beta_{ij} = \tan^{-1}((i' - i_0) \Delta h / r)$$

50

式 18 から i' を代入すると、円錐角は、次のようになる。

$$\beta_{ij} = \tan^{-1} ((i-i_0) \cdot \Delta h / r + (j-j_0) \cdot \delta \cdot D / (a_j \cdot \pi)) \quad (23)$$

【0047】

円錐角 β_{ij} が全てのローの検出器全てでゼロだったなら、再構成が従来のものと同程度の確度しか得られなかっただろう。非消点の円錐角 β_{ij} は画像に再構成誤差を生じるが、円錐角が同一ロー内で等しいかどうか、あるいは、式 23 に示すように、チャンネルからチャンネルへ徐々に変化するかどうかは、円錐角の広がりがあるという条件で、再構成誤差の程度にそれほどの差異を生じない。再構成誤差は、偏差が同一視野か異なる視野のいずれの範囲内に発生するかに係わらず、主として、投影パスの偏差が再構成スライス面からどれだけ逸脱しているかを表す偏差の大きさによって求められる。

10

【0048】

一定 z 補間された投影 S_{ij} はリオーダ投影 R_{ij} から補間されるので、補間された投影 S_{ij} はリオーダ投影 R_{ij} に比べ z 次元で位置的範囲が小さくなる。図 11 は、最初のロー 90 および最後のロー 92 の R_{ij} および S_{ij} の視角 ϕ における z 位置の図面である。隣接ロー間が同間隔ならば、全てのカラムに有効な補間投影 S_{ij} を保つよう、一定 z 補間された投影 S_{ij} のローの行数をリオーダ投影 R_{ij} のものより少なくする必要がある。 R_{ij} に対する元のローの行数を M 、 S_{ij} に対して削減されたローの行数を m とすると、フル・スキャンまたはハーフ・スキャンのいずれかの最長並進距離 D は以下の通りになる。

20

【数 24】

$$D = m \cdot \Delta h \quad (24)$$

ここで、 $m < M$ 。このように、補間された一定 z 投影 S_{ij} 全てを確実にスキャン範囲内に存在させるため、フル・スキャンシステムのための式 24 に定められるように、最大ピッチが D 、そしてハーフ・スキャンシステムのためには $2D$ が好ましい。

【0049】

IV. 等空間間隔の補間

補間された一定 z 投影 $S_{ij}(\phi)$ は、式 3 で円筒検出器アレイに対して定められるように、軸横断方向の扇形において一定角度間隔 δ で分離される元の投影から得られる。元の投影は xy 空間で平行投影 R_{ij} にリオーダされたものだが、間隔が等しくなる好ましい平行ビーム再構成手法とは反対に、隣接投影間の空間間隔は等しくない。それゆえ、一定 z 補間された投影 $S_{ij}(\phi)$ を二次的期間に補間し、結果として得られる等間隔投影 $T_{ij}(\phi)$ が各ローに対して等しい空間間隔 d を有するようにするのが望ましい。

30

【0050】

検出器カラム j の等間隔投影 $T_{ij}(\phi)$ を得るべく補間するため、補間された一定 z 投影 $S_{ij}(\phi)$ における対応カラム j' を以下の関係式から算出する。

【数 25】

$$(j-j_0) \cdot d = r \cdot \sin((j'-j_0) \cdot \delta) \quad (25)$$

40

ここで、 j_0 は図 12 に示す中央カラムである。式 25 を並べ替えると、下記式が定められる。

【数 26】

$$j' = j_0 + \sin^{-1}((j-j_0) \cdot d / r) / \delta \quad (26)$$

投影 $S_{ij}(\phi)$ および $S_{i, j_0+1}(\phi)$ 間の空間間隔である中央カラムおよびその隣接チャンネル間の間隔を定数 d として利用するのが望ましい。

【0051】

50

式26に基づき、等間隔投影 $T_{ij}(\phi)$ は、補間された一定 z 投影 $S_{ij}(\phi)$ からローごとに各視角 ϕ で補間される。この計算には、例えば、公知の四点、または六点エバレット補間法等、より高度な補間法が望ましい。

【0052】

V. 畳み込み処理

本発明手法の次のステップは等間隔投影 $T_{ij}(\phi)$ の畳み込み処理である。ちょうど単一ロー検出器システムの従来スキャナにおける二次元再構成のように、等間隔投影 $T_{ij}(\phi)$ が異なる視角の低周波成分において過剰サンプリングされる。例えば、 $T_{ij}(\phi)$ のDC成分は i 番目のローにおける投影全ての合計を表し、 i 番目ローのX線ビームによって照らし出されるオブジェクトの全容積となる。円錐角 β_{ij} が二次元再構成の場合のようにゼロならば、各ローにおける $T_{ij}(\phi)$ のDC成分は全視角 ϕ に対して同一になる。他の低周波成分はDC成分ほど冗長ではないが、にもかかわらず過剰サンプリングされる。畳み込みはハイパスフィルタとして作用し、低周波成分の重要度を減じ、背景映写の二次元周波数空間におけるサンプリングを均等化する。

10

【0053】

非消点の円錐角 β_{ij} および z 軸沿いの並進により視角が変わるので、元の投影がオブジェクトの同一平面を照らすことはないが、一定 z 位置に補間された投影 $T_{ij}(\phi)$ の場合、円錐角 β_{ij} が小さいなら、それら投影はその z 位置で xy 平面からほんの少しずらされる。すなわち、小さな円錐角に対して、二次元周波数空間のサンプリングは円錐角がゼロの場合と近似する。小さな円錐角に対して、従来の二次元平行ビーム再構成として同一合成核を用いるのは良い近似法である。

20

【0054】

この点を考慮して、本発明の好適な実施形態においては、等間隔投影 $T_{ij}(\phi)$ が従来の合成核で濾過（フィルタ処理）され、濾過された投影 $U_{ij}(\phi)$ がローごとに各視角 ϕ で与えられる。この濾過投影 $U_{ij}(\phi)$ は後に背景映写に使用される。

【0055】

畳み込み処理の効果を理解するために、畳み込み処理なしに背景映写された点像強度分布関数を考えてみる。検出されたオブジェクトの強度データが、単一点を除いて取るに足りないほどわずかなものであれば、背景映写の結果生じた画像強度はこの点で最高限度に達し、周囲領域に分散される。投影に適用されたハイパス合成核はこの点像強度分布関数を増強する。フィルタ処理核は、好ましくは、空間領域において狭い範囲に限定された正弦関数であり、その振幅は中心で最高限度に達し、両側に向かって急速に減少する。それゆえ、フィルタ処理核が適切に働くよう近傍投影を同一平面上に保つことが重要である。しかしながら、ハイパスフィルタ処理核にはあまり反応しないので、中心点から遠いロケーションにあるそれら投影はわずかに平面からずれる。

30

【0056】

V I. 三次元背景映写

A. 概要

畳み込み処理の後、濾過投影 $U_{ij}(\phi)$ は、それら対応するX線ビームパスに沿って背景映写され、三次元立体画像を形成する。円錐角 β_{ij} により、各ボクセルは通常異なるローの濾過投影 $U_{ij}(\phi)$ から異なる視角 ϕ で背景映写される。ボクセルは、正確には検出器の投影パス上には存在していないので、ボクセルに対する背景映写用データは、隣接カラムおよび隣接ローの濾過投影 $U_{ij}(\phi)$ から補間されるべきである。さらに、ヘリカル・スキャンにおいては、 z 方向沿いのオブジェクトの連続断面が絶え間なくスキャンされる。そして、立体画像が断面ごとに絶え間なく正しい順序で再構成されるよう、該データはグループ化され、所定の一つ続きで処理される。

40

【0057】

次に、ガントリと共に回転し、オブジェクトと共に並進する座標形 xyz を考えてみる。この座標系の形をとれば、オブジェクトが z 軸回りを回転しており、ガントリが z 方向に沿って並進していると考えerのと同義である。中央カラム j_0 の軸方向投影パスは、図1

50

3 A、1 3 B、1 3 Cの yz 平面上、この座標系に従ってプロットされる。他のカラム j の軸方向扇形も yz 平面に沿って存在するが x 位置が異なる。

【0058】

図1 3 Bにおいて、視角 ϕ 、 $\phi + \pi$ 、 $\phi + 2\pi$ 、 $\phi + 3\pi$ からの投影パスが重ねられる。これら四つの視角の投影データは、ガントリの中心が z_a 、 z_b 、 z_c および z_d の z 位置にくる半回転毎に得られたものである。これら z 位置は、ピッチの半分、あるいはシステムの一回転につき並進する距離の半分に相当する一定距離 D だけ離れている。半回転の差異により、視角 ϕ および $\phi + 2\pi$ のパスは、視角 $\phi + \pi$ および $\phi + 3\pi$ に対して逆 y 軸方向にプロットされる。

【0059】

立体画像が切断面 m_0 、 m_1 、 m_2 、 m_3 等... に分割される。各切断面は同一枚数 m のオブジェクトスライスを含んでいるが、異なる z 位置に置かれる。図1 3 Aは、複数の第一の視角 0 、 π 、 2π 、 3π における重畳投影パスを示している。図1 3 Cは切断面 $\pi - \Delta\phi$ 、 $2\pi - \Delta\phi$ 、 $3\pi - \Delta\phi$ 、... を再構成する最後の視角を示している。ここで $\Delta\phi$ は視角間隔である。切断面の分割は円錐扇形の場合と同様繰り返される。その結果、各断面を同じように背景映写することができる。三次元マトリックスを一断面ごとの背景映写に使用する。 $0 - \pi - \Delta\phi$ の範囲に及ぶ視角の重畳投影から三次元マトリックスが再構成されると、同一三次元マトリックスが次の断面の再構成にも使用される。

【0060】

例えば、断面 m_1 の背景映写を例にとると、初期視角の各カラムごとに z_c および z_b で 20
 中心化される二つの軸方向扇形が必要である。視角 ϕ では、 z_a で中心化される軸方向扇形用のデータがさらに必要となる。このように、一カラムにつき三つの軸方向扇形の二つが各断面 m_0 、...、 m_3 をある視角で背景映写するのに必要となる。また、スライス幅を変えることなく、一断面につきスライス数を減らすことにより、わずかに二つの軸方向扇形に対する要求を減らすことも可能だ。しかしながら、これらスライス間で共用され得る演算もあるので、全体の背景映写効率は、少ない断面により多くのスライスを用いて改善することができる。

【0061】

B. 軸方向扇形分離線の重複

合成された二つの軸方向扇形、例えば扇形1 0 0 aおよび1 0 0 B間の境界1 0 2が若干 30
 重なり合っているてもよい。重複の度合いは、どのようにリオーダ投影 $R_{ij}(\phi)$ が一定 z 投影 $S_{ij}(\phi)$ に補間されるかにより、かつ、ヘリカル・スキャンに使用されるピッチ D の大きさによる。上述した中点 C_{ij} が投影の z 位置測定に使用され、ガントリの半回転に対して式2 4で定めたように、並進距離が $D = m * \Delta h$ なら、 $S_{ij}(\phi)$ の二つの重畳軸方向扇形は、検出器カラムごとに重ね合わせなくとも完璧に一致する。これは、中点 C_{ij} を一定 z 位置補間用の基準点として使用する上で重要な利点である。

【0062】

中央検出器カラムおよび中心からある距離を置いて位置付けされた検出器カラムに対する $S_{ij}(\phi)$ 、 $S_{ij}(\phi + \pi)$ および $S_{ij}(\phi + 2\pi)$ の分布状態を図1 4および1 5 40
 においてそれぞれ yz 空間に示す。一定 z 間隔 Δh のロケーションは、全て $S_{ij}(\phi)$ 、 $S_{ij}(\phi + \pi)$ および $S_{ij}(\phi + 2\pi)$ に対して z 軸上にある。

【0063】

他の実施形態において、図9の点 b_{ij} が一定 z 補間用の基準点として使用されるなら、中央カラムから離れて位置する検出器カラムに対する $S_{ij}(\phi)$ の分布状態は、比較用の図1 6に示すようになる。ここで、中央カラムの分布状態は図1 4と同様だが、図1 5の中点 c_{ij} に基づくものとは異なり、一定 z 間隔 Δh のロケーションは xz 平面上、すなわち $y = 0$ がない。このように、一定 z 位置の分布状態が劣っているので、演算数を増すだけでなく、境界領域付近に位置するボクセルに対する背景映写の確度をより低めることになる。

【0064】

10

20

30

40

50

ピッチがより短い場合、例えば $D < m * \Delta h$ の場合、境界領域 102 で重複しているものがある。二つの重畳軸方向扇形が完全に一致するピッチでスキヤニングが行われていても、それより短いピッチであっても、分離線 86 が境界領域を横切るように使用され、軸方向扇形 100A および 100B を背景映写用に分離する。ここで、図 17 に示すように、わずかに重複した領域 102 に対して、二つの軸方向扇形ソース 82A および 82B を接続する線を分離線として選択するのが好ましい。

【0065】

この分離線 86 を越えた軸方向扇形 100A または 100B いずれかの投影は背景映写に使用されない。例えば、重複領域 102A に相当する投影、軸方向扇形 100A の一部、および重複領域 102B に相当する投影は考慮から外される。この構成のもと、重複領域 102A および 102B 範囲内の投影は一意的にその範囲が限定される。視角 ϕ では、ボクセルがこの分離線 86 のいずれかの側に位置し、その側の軸方向扇形からの投影値のみがボクセルに対して背景映写される。

【0066】

異なるカラムの分離線 86 は互いに平行ではない。なぜならば、軸方向扇形の z 位置がカラムに依存しているためである。図 17 に示すように、既定視角 ϕ において、二つの対向する軸方向扇形ソースの z 位置が z_a および z_b だと仮定する。 z_a および z_b 間の差異は、 $i = i_0$ の状態にすると共に、濾過投影 $U_{ij}(\phi + \pi)$ におけるカラムが $U_{ij}(\phi)$ に対して逆の順序となることに注目することにより、式 16 から得ることができる。

【数 27】

$$z_b - z_a = D + 2\delta * (j - j_0) * D / \pi \quad (27)$$

z_a および z_b 間の中間位置も、 ϕ を z_b に対する $\phi + \pi$ で置き換え、 $i = i_0$ を設定することにより式 16 から得られる。

【数 28】

$$(z_b + z_a) / 2 = D / 2 + \phi * D / \pi \quad (28)$$

式 27 および 28 を用い、分離線 z_{sj} の z 座標を下記式から y 座標の関数として算出することができる。

【数 29】

$$z_{sj} = (z_b + z_a) / 2 - y * (z_b - z_a) / 2a_j \quad (29)$$

式 29 および 16 において、 $U_{ij}(\phi)$ の中央ローの位置は $\phi = 0$ の場合 $z = 0$ である。すなわち、 $\phi = 0$ の場合 $z_{sj} = 0$ である。通常の場合、式 26 にはオフセット z_0 が以下のように付加される。

【数 30】

$$z_{sj} = z_0 + (z_b + z_a) / 2 - y * (z_b - z_a) / 2a_j \quad (30)$$

ここで、 z_0 は視角 $\phi = 0$ の場合の z_a の値で、 a_j は式 9 によって定められる。

【0067】

C. 二段階背景映写

本発明プロセスの次のステップは、二段階の背景映写をもたらすもので、各々が補間処理を伴う。第一の補間段階はボクセルの x 位置に基づく。そして、対応するカラム j_x が算出され、濾過投影値 U_{ij_x} が隣接カラム $U_{ij_x - 1}$ および $U_{ij_x + 1}$ から補間される。ここで、各ローの重畳投影に対して $j \leq j_x < j + 1$ となる。第

二段階は各ボクセルの y および z 位置に基づく。そして、ロケーション (y, z) を横切る対応するロー j_z の投影が算出され、投影値 U_{ij_z} が $U_{ij_z - 1}$ および $U_{ij_z + 1}$ から補間される。ここで、 $i \leq i_z < i + 1$ 。その後、双線型に補間された投影 U_{ij_z} を用いてボクセルの背景映写を行うのがよい。

【0068】

オブジェクトの一断面を再構成するために、図18に示すように、オブジェクト空間に固定された座標系 $x' y' z'$ を用いる。ここで、オブジェクトを表すボクセルの三次元マトリックスにおいて m 枚のスライスが $x' y'$ 平面上にあると仮定する。視角 ϕ の場合、この座標系は角度 ϕ の座標系 $x y z$ に対して z' 軸の回りを回転する。ここで、 z' 軸は z 軸と一致する。ガントリに対するボクセルのロケーションは座標 (x, y) であり、オブジェクト座標 (x', y') におけるボクセルのロケーションから算出できる。 z 位置は回転によって変わらず、異なるスライスから同一 (x', y') ロケーションのそれらボクセルは同一 (x, y) 座標を有する。

【0069】

10

D. 第一段階補間

従来の二次元平行ビーム再構成の場合と同様、 U_{ijx} に対する x 次元の第一段階補間処理が共通利用される。 (x', y', z') が回転角 ϕ におけるボクセルの座標ならば、以下の式が成り立つ。

【数31】

$$x = x' \cos(\phi) + y' \sin(\phi)$$

$$y = y' \cos(\phi) - x' \sin(\phi)$$

$$z = z' \quad (31)$$

20

図18は (x', y') に位置するボクセルの座標 (x, y) を示す。座標 x は対応するカラム番号に変換される。

【数32】

$$j_x = j_0 + x \quad (32)$$

ここで、 j_0 は中央のカラム番号。次に、線形補間により、補間された投影を以下のように算出する。

【数33】

$$U_{ijx} = (j+1-j_x) * U_{ij} + (j_x-j) * U_{ij+1} \quad (33)$$

30

ここで、 $j \leq j_x < j+1$ 。

補間は重畳軸方向線形の両方に実行される。すなわち、式33を用い、 $U_{ijx}(\phi)$ 100Aと、 z 次元のマトリックス範囲内にある $U_{ijx}(\phi + \pi)$ 100Bとに対して補間が行われる。例えば、同一座標 (x, y) だが z 座標の異なる一カラムのボクセル103が図19においてドット印で示される。この例では、これらボクセルのほとんどが $U_{ijx}(\phi)$ 100Aから背景映写されるが、 z 座標の最高値にある二つのボクセル101は $U_{ijx}(\phi + \pi)$ 100Bから背景映写される。

【0070】

40

E. 第二段階補間

U_{izjx} に対する yz 空間での第二段階補間は、第一段階の処理よりさらに洗練られた処理である。ボクセルの座標 (y, z) が与えられると、該ボクセルを横断する対応ロー番号 i_z の投影 U_{izjx} がまず求められる。このロー番号 i_z は、 U_{izjx} の z 軸切片である z 位置の投影 U_{izjx} から算出できる。図20Aに示すように、 $y_a = a_{jx}$ の正の y 軸位置の焦点から広がる $U_{ijx}(\phi)$ のX線ソースから測定の y_1 および z_1 をボクセル105Aの距離を表すものとする。同様に、 $y_b = a_{jx}$ の負の y 軸位置の焦点から広がる $U_{ijx}(\phi + \pi)$ のX線ソースから測定の y_2 および z_2 をボクセル105Bの距離を表すものとする。

この図から以下のことが明らかになる。

50

【数 3 4】

$$\begin{aligned} y_1 &= a_{jx} - y \\ z_1 &= z - z_a \end{aligned} \quad (34)$$

$U_{ijx}(\phi)$ の場合、さらに

【数 3 5】

$$\begin{aligned} y_2 &= a_{jx} + y \\ z_2 &= z - z_b \end{aligned} \quad (35)$$

10

$U_{ijx}(\phi + \pi)$ の場合。

【0 0 7 1】

z 方向に沿って測定される場合、X 線パスは等空間間隔で分離される。図 2 0 B は (y_i, z_i) でボクセルを横断する $U_{ijx}(\phi)$ の投影パスを示す。z 軸上の該パス切片は、

【数 3 6】

$$i_1 - i_{01} = z_1 * a_{jx} / y_1 \quad (36)$$

ここで、 i_{01} は $U_{ijx}(\phi)$ の中央ロー番号で、式 3 6 がボクセルの z 座標の増分に 20 対してロー番号の増分を付与する。

【数 3 7】

$$\Delta i_1 = \Delta z_1 * a_{jx} / y_1 \quad (37)$$

【0 0 7 2】

z 次元のマトリックスが z 軸上の X 線パスの切片と同一間隔であるとして選択されるなら、 $\Delta z_1 = 1$ である。 $U_{ijx}(\phi)$ および $U_{ijx}(\phi + \pi)$ に対するロー増加分がそれぞれ以下になる。

【数 3 8】

$$\begin{aligned} \Delta i_1 &= a_{jx} / y_1 \\ \Delta i_2 &= a_{jx} / y_2 \end{aligned} \quad (38)$$

30

演算をスピードアップするため、 Δi_1 および Δi_2 は、 y_1 および y_2 に基づいてルックアップテーブルから得てもよい。

【0 0 7 3】

分離線の $z_{\delta jx}$ のロケーションはこれら二つの軸線扇形間にあり、式 3 1 から $j = j_x$ および y を援用し、式 2 7、2 8 および 3 0 から算出できる。

$0 \leq z < z_{\delta jx}$ の z ロケーションを持つボクセルに対して、軸方向扇形 $U_{ijx}(\phi)$ が背景映写のために補間される。補間ロー番号は下記式から演算される。 40

【数 3 9】

$$i_z = i_{01} + z_1 * \Delta i_1 \quad (39)$$

ここで、 z_1 および Δi_1 は式 3 4 および 3 8 によって定められる。

背景映写の最終投影値は

【数 4 0】

$$U_{ijx}(\phi) = (i + 1 - i_z) * U_{ijx}(\phi) + (i_z - i) * U_{i,jx+1}(\phi) \quad (40)$$

ここで、 $i \leq i_z < j + 1$ 。

50

【0074】

$z_{ajx} \leq z < m$ の z ロケーションを持つボクセルに対して、他の軸方向扇形 U_{ijx} ($\phi + \pi$) が背景映写のために補間される。補間ロー番号は下記式から演算される。

【数41】

$$i_z = i_{o2} + z_2 * \Delta i_z \quad (41)$$

ここで、 i_{o2} は U_{ijx} ($\phi + \pi$) の中央ロー番号で、背景映写の最終投影値は

【数42】

$$U_{ijx}(\phi) = (i + 1 - i_z) * U_{ijx}(\phi + \pi) + (i_z - i) * U_{i,jx+1}(\phi + \pi) \quad (42)$$

10

ここで、 $i \leq i_z < i + 1$ 。

【0075】

V I I I . 改善された検出器アレイ幾何学配列

上記説明および図解は対称形円筒検出器アレイに基づくものであり、以後標準幾何学配列の検出器アレイと称する。他の幾何学配列の検出器アレイも可能であり、適宜変更を加えることによって一層望ましいものにすることも考えられる。

【0076】

一例として、図2の標準幾何学配列の検出器アレイに対して、一定 z 補間の上記手法を取得データを全利用する場合に限ってみる。なぜならば、検出器素子53のトップロー56 Aおよびボトムロー56 C近辺から得られた投影データの一部がこの補間の場合限度を越えているためである。これは、図11からより明確に確かめられたことである。ここで、丸印92を付けた投影は、最初のローの検出器素子53の検出器から収集されたりオーダ投影 R_{ij} である。ヘリカル・スキャンの並進により、該りオーダ投影 R_{ij} は z 軸に対して垂直な平面にはない。対照的に、四角印を付けた投影は、最初のローの一定 z 補間された投影 S_{ij} であり、実質的に z 軸に対して垂直な平面にあり、前提となる一定 z 位置を維持する。 S_{ij} の範囲を越えた z 位置が、例えば S_{0j} の一定 z 補間のために選択されるなら、 S_{0j} の一部はりオーダ投影の領域外になり、適切に補間され得ない。 S_{ij} の最初のローおよび最後のローの間で補間された投影とは異なり、部分的に補間された投影 S_{0j} は、オブジェクトの軸横断方向の全断面を通過する全ての投影を含んでいないので、フィルタ処理背景映写法によって要求される画像の再構成には使用できない。

20

30

【0077】

したがって、 R_{ij} および S_{ij} 間で図11の三角形領域91 Aにあるりオーダ投影 R_{ij} は過剰データで、一定 z 補間および後続動作には使用できない。これら過剰データは検出器素子53の左上コーナーの検出器から到来するが、オブジェクトの画像を再構成する範囲から外れていると考えられる。同様に、図11の下部三角領域91 Bのりオーダ投影 R_{ij} も、アレイの右下コーナーの検出器から得られた範囲外データである。範囲外データによって、ヘリカル・スキャンの最大ピッチはそれ以下となるか、さもなければ検出器アレイの物理的範囲から推定されるものとなる。ガントリの半回転中に全てのローの検出器アレイによって範囲が限定される距離の端から端までオブジェクトを並進させる代わりに、オブジェクトは約 $2/3$ の距離にわたって並進されるにすぎない。

40

【0078】

取得データ利用の不足、およびピッチの削減は、本発明に係わるより好ましい幾何学配列に検出器アレイを構成することによって修正することができる。これを達成する各種代替手法を以下に述べる。

【0079】

図21 Aに示すように、例えば7行のローと31列のカラムを有する標準対称形円筒検出器アレイは、一例として以下論考に用いられる。実用上、カラム数 j は通常ロー数よりも大きく、その数は偶数でも奇数でもよい。同一検出器アレイの二次元説明図を図21 Bに示し、検出器53の相対的ロケーションおよび直交関係を説明する。

50

【0080】

残りの図面と関連して説明するため、オブジェクトの相対並進方向が正のz軸の並進方向を定める矢印の方向であると仮定する一方、検出器アレイ（回転方向）のリーディングエッジを検出器の左端と考える。

【0081】

一定z補間による範囲外データは、回転角ごとに、二つの対向するコーナー120Aおよび120B（検出器アレイの後部リーディングおよび前部トレーリングコーナー）付近のそれら検出器素子から得られる。本発明の一樣態によれば、それら範囲外の区域120Aおよび120Bの検出器素子が間引き（過疎化）されるか、二つの対向するコーナー122Aおよび122B（検出器アレイの前部リーディングおよび後部トレーリングコーナー）が過密化されるか、あるいは両方行うかして、アレイの各検出器素子が収集するデータを全活用するようにする。

10

【0082】

過疎化構成を有する検出器アレイを図22Aに示す。この配列は、図2Aに示す標準幾何学配列と同一数の検出器カラムjを有するが、トップおよびボトムローiは部分的に占有しているに過ぎない。一定z補間法に関連して上記で定義した標準幾何学配列の数式全てが図22Aの過疎化構成に適用可能である。異なる部分は、領域120Aおよび120Bにおける範囲外データ（いずれの場合も背景映写には用いられない）が無効である点のみである。

【0083】

過密構成を有する検出器アレイを図22Bに示す。この構成においては、検出器素子が対向コーナー122Aおよび122Bに付加され、全ての検出器からのデータが背景映写に有効である。外周ローの素子全てを植えつけなくても検出器アレイのローの有効数iが増加される。

20

【0084】

図23に示す第二の好適な構成においては、同一ローの検出器が異なるz位置を有する。すなわち、検出器アレイが並進軸に沿ったz位置に対してカラムに依存する。各カラムjは、同一ローiの検出器が円筒面に沿ったヘリカルパスと対応する量だけz方向に沿って移動される。より正確には、ローiおよびカラムjの検出器が下記式のzロケーション H_{ij} に配置される。

30

【0085】

【数43】

$$H_{ij} = (j - j_0) * \Delta H + (j - j_0) * \delta * D * R / (\pi * a_j) \quad (43)$$

ここで、変数は従来通りに定められる。特に、 Δh は隣接ローの検出器間の空間間隔であり、 δ は隣接カラムの検出器間の角度間隔である。式(10)乃至(13)から、この移動構成における中点 C_{ij} のz座標は以下になる。

【数44】

$$z_{ij} = (i - i_0) * \Delta h * a_j / r + (j - j_0) * \delta * D / \pi. \quad (44)$$

40

式(14)から、この移動構成の扇形ビーム投影 $P_{ij}(\theta)$ のz位置は以下になる。

【数45】

$$z_{ij}(\theta) = (i - i_0) * \Delta h * a_j / r + (\theta + (j - j_0) * \delta) * D / \pi \quad (45)$$

標準構成の式(15)と比べた場合。この移動構成のリオーダ平行ビーム投影 $R_{ij}(\phi)$ は以下になる。

【数46】

$$z_{ij}(\phi) = (i - i_0) * \Delta h * a_j / r + \phi * D / \pi \quad (46)$$

50

標準幾何学配列の式 16 と比べた場合。

【0086】

ファクタ a_j / r は中央カラム $j = j_0$ 近辺で 1.0 に相当する。軸横断方向扇形の扇形角、すなわち $2\gamma_{max}$ は 60° で、最悪の場合のファクタ a_j / r は、 $j = 1$ または $j = N$ の場合で $\cos 30^\circ = 0.866$ である。したがって、式 46 に示すように、リオーダ投影 $R_{ij}(\phi)$ は、中央領域付近の各ローの投影に対してかろうじて一定 z 位置を保つ。上記一定 z 補間法はこの実施形態に対してもなお好ましいものであるが、中央カラム j_0 近辺のそれらカラムにはそれほど有益な効果を有していない。中央カラム j_0 から最も遠いカラム j に対しては、一定 z 補間が図 21a の標準幾何学配列におけるのと同様重要である。しかしながら、最悪の場合、補間点の z ロケーションは、15% 程度の距離 $(i - i_0) \Delta h$ だけ収集データポイントと異なる。これは、相対的に少ない数の検出器がこの構成で範囲外となることを意味する。図 11 の標準幾何学配列との比較として、トップおよびボトムローのリオーダ投影 $R_{ij}(\phi)$ の z ロケーション、および一定 z 補間された投影 $S_{ij}(\phi)$ を図 24 に示す。ここでは、トップおよびボトムロー 202A および 202B だけが示されているので、一定 z 補間された投影 $S_{ij}(\phi)$ が、中央カラム j_0 付近で最大程度、ほとんどリオーダ投影 $R_{ij}(\phi)$ から逸れているように見える。しかしながら、実際には、中央カラム付近では、ロー i から得られ補間された投影 S_{ij} は隣接ロー i' の R_{ij} ときわめて近い関係を有している。近接関係は選んだ補間間隔に左右される。

【0087】

下記式のように各カラムが $(j - j_0) * \delta * D * R / (\pi * r)$ の量だけ移動するなら、

【数 47】

$$H_{ij} = (i - i_0) * \Delta h + (j - j_0) * \delta * D * R / (\pi * r) \quad (47)$$

式 43 の代わりに、ポイント b_{ij} の z 座標が下記式によって表される。

【数 48】

$$h_{ij} = H_{ij} * r / R = (i - i_0) * \Delta h + (j - j_0) * \delta * D / \pi \quad (48)$$

それゆえ、図 8 および 9、および対応する説明に関して、 c_{ij} の代わりに、 b_{ij} を一定 z 補間の中点として利用するなら、 b_{ij} の z 座標が $z_{ij} = h_{ij}$ となり、リオーダ投影 $R_{ij}(\phi)$ の z 位置が以下ようになる。

【数 49】

$$z_{ij}(\phi) = (i - i_0) * \Delta h + \phi * D / \pi \quad (49)$$

この状態下、リオーダ投影 $R_{ij}(\phi)$ は、各ローの投影に対する一定 z 位置を有し、一致 z 補間はもはや必要なくなる。しかしながら、 c_{ij} よりもむしろ b_{ij} が、背景映写プロセス時の投影パス中点として利用するには好ましい。

【0088】

図 25 に示すように、他の実施形態においては、図 23 における実施形態のように並進軸に対して各カラムを移動するだけでなく、カラムの素子を z 次元に沿って延長または広げ、ロー i とカラム j にある検出器の z ロケーションを以下のように配置する。

【数 50】

$$H_{ij} = (i - i_0) * \Delta h * r / a_j + (j - j_0) * \delta * D * R / (\pi * a_j) \quad (50)$$

この構成の幾何学配列は、式 45 におけるファクタ a_j / r を削除し、リオーダ投影 $R_{ij}(\phi)$ の z 位置が以下ようになる。

【数 51】

$$z_{ij}(\phi) = (i - i_0) * \Delta h + \phi * D / \pi \quad (51)$$

10

20

30

40

50

これは理想的な構成であり、ここでは、リオーダ投影 $R_{ij}(\phi)$ が各ローの投影に対して一定 z 位置を有する。また、全ての取得データが十分に利用されるので、一定 z 補正の必要もない。なお、式 50 の第一項のファクタ r/a_j は伸張ファクタである。該ファクタは、中央カラム $j = j_0$ の場合 1.0 と等しく、アレイの両端に向けて徐々に増大する。アレイの最端のカラムに対して、すなわち $j = 1$ または $j = N$ の場合、カラムの大きさは最大ファクタ $1.0 / \cos 30^\circ = 1.155$ (軸横断方向扇形角を 60° とする) まで引き延ばされるが、中央カラムと同一数の検出器を維持する。

【0089】

図 26 の平面図に示す他の構成においては、式 43 に従い各カラムを z 方向に沿って移動する。すなわち、中央カラム j_0 から遠く離れたカラムは X 線ソース S により近い場所に置かれる。例えば、図示の変更された輪郭線を検出器ローがたどるようにしてもよい。該変更輪郭線は円周輪郭線からわずかにそれている。この実施形態において、カラム j および X 線ソース間の好ましい距離は $R_j = R * a_j / r$ となる。この距離で、カラムの軸方向扇形角は、X 線ソース側から見ると、上述した伸張ファクタによって与えられたのと同程度延長される。結果として、該構成は、各カラムの検出器を物理的に伸ばすことなく、リオーダ投影が各ローの投影に対して一定 z 位置を有するような上記構成と同じ理想的な状態を達成する。

【0090】

なお、標準幾何学配列から改良した上記構成は、各々特定ピッチ $2D$ に対して最適化される。空間分布を変更しようが検出器のロケーションを改めようが、いずれにしても、範囲外データを最少数にとどめるか、あるいは一定 z 補間の度合いを最小限にする上で、改良の程度は広がり D に左右される。

【0091】

図 27A に示す他の実施形態においては、検出器アレイが標準幾何学配列で構成されている。しかしながら、この場合、検出器アレイはわずかな角度 α をつけてガントリに取り付けられている。角度 α は $\alpha \neq 0$ であり、傾斜角と称され、(各ローの検出器が $x-y$ 平面内に配列されているか、あるいは $x-y$ 平面と平行に置かれている位置から) y 軸、すなわちビーム軸回りを回転する。ここで、ビーム軸とは、X 線ソースと検出器アレイの中心とによって定義された軸のことである。検出器および角度 α は、モータ 203 およびコントローラ 205 によって駆動される回転可能なマウント 207 上で可変に位置付けられるのが好ましい。傾斜角 α により、各検出器の z 位置および角度位置はいずれもローおよびカラム双方に依存する。好ましい傾斜角 α はわずかな角度で、例えば 5° より小さい。したがって、図 27B に示すように、円筒形検出器アレイをカラム間に等角間隔 δ を有するプレーナ検出器アレイと見なすのは、検出器の z 位置および角度位置を演算する上で理にかなった近似手段である。

【0092】

角度位置の変動量は中央ロー j_0 の検出器から算出することができる。傾斜角 α が存在しなければ、中央ロー j_0 は軸横断方向扇形であり、カラム j にある検出器は $\gamma = (j - j_0) * \delta$ の扇形角を有する。検出器アレイが角度 α で傾斜している場合、図 28 に示すように、軸横断方向平面上で測定される検出器の扇形角は γ_a まで縮小される。図 28 から以下のことがわかる。

【数 52】

$$\gamma_a = \gamma * \cos \alpha \quad (52)$$

式 52 は、 γ_a は γ_0 に比例するが、軸方向扇形間の軸横断方向平面上で測定された角度間隔は傾斜した検出器アレイにおいてもなお一定であることを示す。角度間隔を δ_a とすると、式 52 は以下の通り定まる。

【数 53】

$$(j-j_0) * \delta_a = (j-j_0) * \delta * \cos \alpha,$$

10

20

30

40

あるいは

$$\delta_a = \delta * \cos\alpha. \quad (53)$$

傾斜角度 α の結果として、各カラムの軸方向扇形も角度 α だけ傾斜するので、背景映写の基準として適したものではもはやない。しかしながら、直立軸方向扇形、すなわち z 軸と平行な軸方向扇形を傾斜した投影から補間することができる。直立軸方向扇形を得る補間点のロケーションを図 29 に示す。ここでは、隣接する軸方向扇形間の角度間隔が δ_a に縮小されている。なお、中央ロー i_0 だけは例外で、その補間点が検出器ロケーションと一致している。

【0093】

10

カラム間の空間間隔がロー間のそれと同一だとすると、すなわち、 $\delta * R = \Delta H$ の場合、カラム寸法の単位 δ はロー寸法の単位 ΔH に相当する。傾斜した軸方向扇形を有するカラム番号 q および直立軸方向扇形を有するカラム番号 j 間の関係を下記式と共に図 30 に示す。

【数54】

$$(j-j_0)*\delta_a = (q-j_0)*\delta * \cos\alpha - (i-i_0)*\delta * \sin\alpha \quad (54)$$

式 53 および 54 を組み合わせると以下の関係が定まる。

【数55】

$$q = j + (i-i_0) * \tan\alpha \quad (55)$$

20

ロー i およびカラム j の直立軸方向扇形の z ロケーションも図 30 に示す。以下のようになる。

【数56】

$$H_{ij} = (i - i_0)*\Delta H / \cos\alpha + (j-j_0)*\Delta H * \sin\alpha \quad (56)$$

ここで図 30 から、第二項は $(j - j_0) \delta_a * \tan\alpha * \Delta H * / \delta$ から得られ、式 53 の関係は以下になる。

【数57】

$$\text{Let } \Delta h_2 = \Delta h / \cos\alpha \quad (57)$$

30

そして、これを式 (10) 乃至 (13) に当てはめると、中点 c_{ij} の z 座標は以下のようになる。

【数58】

$$z_{ij} = (i - i_0)*\Delta h_a * a_j / r + (j-j_0)*\Delta h * \sin\alpha * a_j / r. \quad (58)$$

$Q_{ij}(\theta)$ をロー i およびカラム j の補間投影とし、回転角 θ の直立軸方向扇形を有するとする。すなわち、カラムロケーションが q に位置する i 番目のローの収集投影 $P_{ij}(\theta)$ から補間されるものとする。また、 k は切り捨て整数、すなわち q および g_k の残とする。

40

【数59】

$$q = k + g_k. \quad (59)$$

線形補間を用いると、補間投影 $Q_{ij}(\theta)$ は、式 55 および 59 を用いて、収集された扇形ビーム投影 $P_{ij}(\theta)$ から補間され、以下のようになる。

【数60】

$$Q_{ij}(\theta) = P_{iq}(\theta) = (1.0 - g_k) * P_{ik}(\theta) + g_k * P_{i,k+1}(\theta) \quad (60)$$

補間扇形ビーム投影 $Q_{ij}(\theta)$ は、ローおよびカラム間の間隔が Δh_a および δ_a となるのを除き、標準幾何学配列上投影 $P_{ij}(\theta)$ の相似形となる。 $Q_{ij}(\theta)$ の z 位置

50

は下記式で表される。

【数 6 1】

$$z_{ij}(\theta) = z_{ij} + \theta * D/\pi. \quad (61)$$

$P_{ij}(\theta)$ の場合のように、 $Q_{ij}(\theta)$ が平行ビーム投影 $R_{ij}(\phi)$ にリオーダされる場合、 $R_{ij}(\phi)$ の z 位置は下記式で表される。

【数 6 2】

$$z_{ij}(\phi) = z_{ij} + (\phi - (j - j_0) * \delta_a) * D/\pi \quad (62)$$

これは、 θ を式 6 1 の ϕ 、 $(j - j_0) * \delta_a$ に置き換えることにより得られる。式 5 8 10 を用いると、 z 位置は以下になる。

【数 6 3】

$$z_{ij}(\phi) = (i - i_0) * \Delta h_a * a_j / r + (j - j_0) * (\Delta h * \sin \alpha * a_j / r - \delta_a * D/\pi) + \phi * D/\pi \quad (63)$$

【0 0 9 4】

傾斜角 α は以下のものを選ぶのがよい。

【数 6 4】

$$\sin \alpha = \delta_a * D / (\Delta h * \pi)$$

20

これは下記式と同一である。

$$\tan \alpha = \delta_a * D / (\Delta h * \pi) \quad (64)$$

この傾斜角に関して、 z 位置は以下になる。

【数 6 5】

$$z_{ij}(\phi) = (i - i_0) * \Delta h_a * a_j / r - (1 - a_j / r) * (j - j_0) * \delta_a * D/\pi + \phi * D/\pi \quad (65)$$

式 6 5 は、中央カラム j_0 近辺では、リオーダ投影 $R_{ij}(\phi)$ が以下のような一定 z 位置に近いものとなる。 30

【数 6 6】

$$z_{ij}(\phi) = (i - i_0) * \Delta h_a + \phi * D/\pi$$

図 2 3 に示すカラム検出器の移動を伴う構成のように、間違いのない結果を獲得すべく一定 z 補間を利用するのになお好ましいものである。にもかかわらず、範囲外データの量は傾斜角で著しく削減される。

【0 0 9 5】

上記図解および数式の展開により、図 2 7 a の傾斜検出器アレイ構成の一般幾何学配列が既定される。しかしながら、仮定した近似法では、検出器アレイを等カラム間に角度間隔を有したプレーナーアレイと見なしているの、理論的に正当で、かつより正確な展開のために、検出器アレイの円筒形幾何学配列を考慮する必要がある。これを図 3 1 に示す。ここでは、軸横断方向扇形が角度 α だけ傾斜している。扇形角 γ は軸横断方向平面で γ_a に縮小され、以下の関係が成り立つ。

【数 6 7】

$$\tan \gamma_a = \tan \gamma * \cos \alpha \quad (66)$$

これを式 5 2 と比較すると、 γ_a がもはや γ と比例していないのがわかる。このように、軸横断方向平面上で測定すると、傾斜した軸方向扇形間の角度間隔は一

定でない。式 6 6 から、 γ が非常に小さく $\gamma_a \approx \gamma * \cos \alpha$ である中央カラム

50

j_0 付近で、この角度間隔は以下になる。

【数 6 7】

$$\delta_a = \delta * \cos\alpha \quad (67)$$

これは式 5 3 と同じである。 δ_a を直立軸方向扇形の一定角度間隔として用いるが望ましい。該直立軸方向扇形は傾斜した軸方向扇形から補間される。傾斜した軸方向扇形を有するカラム番号 q および直立軸方向扇形を有するカラム番号 j 間の関係は図 3 2 から得られる。同図から以下が成り立つ。

【数 6 8】

$$R' \tan \gamma_a = R' \tan \gamma_0 * \cos\alpha \quad \text{ここで、} \gamma_0 = \gamma - \Delta\gamma_0$$

10

すなわち、

$$\tan((j-j_0)*\delta_a) = \tan((q-j_0)*\delta - (i-i_0)*\delta*\tan\alpha) * \cos\alpha \quad (68)$$

これから、以下の関係が得られる。

【数 6 9】

$$q = j_0 + \tan^{-1}(\tan((j-j_0)*\delta_a)/\cos\alpha) / \delta + (i-i_0)*\tan\alpha \quad (69)$$

番号 q に基づき、式 5 9 および 6 0 で説明したように、 $Q_{ij}(\theta)$ を $P_{ij}(\theta)$ から補間できる。

20

ロー i およびカラム j の直立軸方向扇形の z ロケーションを図 3 3 に示す。

【数 7 0】

$$H_{ij} = (i - i_0) * \Delta H / \cos\alpha + R' \tan \gamma_a * \tan\alpha$$

$$\text{ここで、} \gamma_a = (j-j_0)*\delta_a = (j-j_0)*\delta*\cos\alpha$$

$$\Delta H = R * \delta、および以下の関係 R'/R = \cos\gamma = a_j / r$$

を用いると、下記式が定まる。

$$H_{ij} = (i - i_0) * \Delta H / \cos\alpha + (j-j_0) * \Delta H * \sin\alpha * (\tan\gamma_a / \gamma_a) * (a_j / r) \quad (70)$$

30

式 7 0 は式 5 6 と同じであるが、ファクタ $\sin\alpha$ が $(\tan\gamma_a / \gamma_a) * (a_j / r)$ によって変更されている点異なる。その結果、式 6 3 は以下になる。

【数 7 1】

$$z_{ij}(\phi) = (i - i_0) * \Delta h_a * a_j / r + (j-j_0) * (\Delta h * \sin\alpha * (\tan\gamma_a / \gamma_a) * (a_j / r)^2 - \delta_a * D / \pi) + \phi * D / \pi \quad (71)$$

ここで、 Δh_a は式 5 7 で定められる。

【0 0 9 6】

40

傾斜角 α は以下のものを選ぶのがよい。

【数 7 2】

$$\tan\alpha = \delta * D / (\Delta h * \pi) \quad (72)$$

これは式 6 4 と同一である。この傾斜角に関して、 z 位置は以下になる。

【数 7 3】

$$z_{ij}(\phi) = (i - i_0) * \Delta h_a * a_j / r - (1 - (\tan\gamma_a / \gamma_a) * (a_j / r)^2) * (j-j_0) * \delta_a * D / \pi + \phi * D / \pi \quad (73)$$

式 6 5 と同様、この傾斜角では、中央カラム j_0 近辺のリオーダ投影 $R_{ij}(\phi)$ が以下

50

のような一定 z 位置に近いものとなる。

【数 7 4】

$$z_{ijm}(\phi) = (i - i_0) \Delta h_a + \phi \cdot D / \pi$$

【0097】

この理論的に正当な手法を用いることにより、プレーナー幾何学配列近似法を用いて得られる結果と非常に近い結果が得られる。しかしながら、リオーダ処理および一定 z 補間のためのロケーション q および $z_{ij}(\phi)$ を求めるのはより複雑なものとなる。再構成に近似法を用いるか正当な手法を用いるにかかわらず、上記説明および図解は、図 27A の傾斜構成を用いることにより、標準幾何学配列のように画像を再構成できるだけでなく、検出器素子をより有効に利用することができることを実証するものである。傾斜角 α は、式 64 または 72 で得られたように、ヘリカル・スキャンのピッチに応じて選択され、この傾斜角で範囲外データの数をも最小限にする。

10

【0098】

また、傾斜角 α を調節できる機能を搭載するのも望ましい。傾斜角をゼロに設定できれば、例えば、テストやキャリブレーションの際役に立つ。また、モータ駆動の機構を用いてもよく、その場合、必要に応じてスキャン毎に傾斜角を新しい設定に再位置付けできる。また、モータ駆動式制御で、静止スキャン用システムをゼロ傾斜角で構成することもできる。さらに、異なる並進速度に対して異なる傾斜角を設定することもできる。逆ヘリカル・スキャン並進の場合は、逆傾斜角が設定できる。

20

【0099】

本発明を特にその好適実施形態に関して示し説明したが、当業者にとっては、添付の請求の範囲に定義された本発明の範囲を逸脱することなく、形式および詳細において種々の変更が可能ながわかる。

【0100】

例えば、改良された検出器アレイの幾何学配列の動作を、本願および以下参照文献、“Method and Apparatus for Reconstructing Volumetric Images in a Helical Scanning Computed Tomography system with Multiple Rows of Detectors”（複数ローの検出器を備えたヘリカルスキャン・コンピュータ断層撮影システムにおける立体画像の再構成方法および装置）と題し、1998年3月11日にChing-Ming Laiによって出願され、ここに参照として援用される米国特許出願09/038,320号に開示した一定 z 補間法に従って説明したが、本発明の適用は一定 z 補間を利用する再構成法に限られるものではない。さらに本発明は、“Improved Detector Array Geometry for Helical Scanning Volumetric Computed Tomography System”（ヘリカルスキャン・立体的コンピュータ断層撮影システムのための改良検出器アレイ幾何学配列）と題し、1998年4月24日にChing-Ming Laiによって出願され、ここに参照として援用される米国特許出願09/066,494号に記載された連続近似の再構成手法にも適用可能である。

30

40

【図面の簡単な説明】

本発明の前記および他の目的、特徴および利点は、添付図面に図解された本発明の好適実施形態のより詳細な説明から明らかとなる。該図面において、同じ参照符号は、異なる図面においても同一部分を示す。これら図面は必ずしも正確なスケールを意図しておらず、本発明の原理の図解に力点が置かれている。

【図1】従来のコンピュータ断層撮影システムの従来技術において、回転の z 軸に垂直な軸横断方向扇形ビームの範囲を限定する x 線ソースおよび単一ローの検出器を示す。

【図2】従来の円錐ビーム断層撮影システムの従来技術において、複数の軸横断方向扇形ビームおよび複数の軸方向扇形ビームの範囲を限定する x 線ソースおよび複数ロー検出器アレイを示す。

50

【図 3】図 2 のシステムの軸横断方向扇形ビームを示し、各ビームは異なるローの検出器に向けられ、 $2 \gamma_{max}$ の軸横断方向扇形角を有し、 xy 平面に対し相対的な円錐角 β の位置にある。

【図 4】図 2 のシステムの軸方向扇形ビームを示し、各ビームは異なるカラムの検出器に向けられ、 $2 \beta_{max}$ の扇形角を有し、 yz 平面に対し相対的な角度 γ の位置にある。

【図 5】A は、静止スキャンにおいて、視角 ϕ および $\phi + \pi$ で対向する軸方向扇形ビームを表す。B は、ヘリカルスキャンにおいて、視角 ϕ および $\phi + \pi$ で対向する軸方向扇形ビームを表す。

【図 6】本発明に係わり、軸横断方向扇形ビームの投影からリオーダされた平行投影を示す図である。

10

【図 7】本発明に係わり、軸横断方向扇形ビームおよび対応する投影パスの中点の幾何学的配列を示す図である。

【図 8】本発明に係わり、図 7 の投影パスの中点を示す平面図である。

【図 9】本発明に係わり、図 7 の投影パスの中点の軌跡を示す側面図である。

【図 10】A は、本発明に係わり、中央検出器カラム j_0 の円錐角を示す図である。B は、本発明に係わり、 j 番目のカラム検出器の円錐角を示す図である。

【図 11】本発明に係わり、一定 z 補間前後の最初と最後のローの投影データ z 位置を示す図である。

【図 12】A、B および C は、本発明に係わり、 z 軸に対して並進する複数の視角からの軸投影を示す。

20

【図 13】本発明に係わり、中央検出器カラムに対して一定 z 補間を施した投影 $S_{ij}(\phi)$ の分布を示す。

【図 14】本発明に係わり、補間のため中点として C_{ij} を用い、中央カラムからある間隔で位置付けられた検出器カラムに対して一定 z 補間を施した投影 $S_{ij}(\phi)$ の分布を示す。

【図 15】本発明に係わり、補間のため中点として b_{ij} を用い、中央カラムからある間隔で位置付けられた検出器カラムに対して一定 z 補間を施した投影 $S_{ij}(\phi)$ の分布を示す。

【図 16】本発明に係わり、 W が重複領域の幅である対向軸方向扇形と、背景映写のために各扇形範囲を制限する分離線とを示す。

30

【図 17】本発明に係わり、オブジェクトスペースに固定された座標系 (x', y', z') のオブジェクトの一断面の再構成を示すと共に、背景映写の第二段階補間の幾何学配列を示す。

【図 18】本発明に係わり、背景映写の第二段階補間の幾何学配列を示す。

【図 19】A および B は、本発明に係わり、背景映写の第二段階補間の幾何学配列を示す。

【図 20】A は、本発明に係わり、オブジェクトの断層撮影画像化に適した対称円筒形検出器アレイの一例を示す斜視図であり、該アレイは 7 行のローと 31 列のカラムからなる。B は、本発明に係わり、図 21 A の円筒形検出器アレイを二次元形式で図示したものである。

40

【図 21】A は、本発明に係わり、図 21 A および 21 B の検出器アレイを図解したものであり、例えば画像品質に寄与しない検出器等、不必要な検出器素子が間引き（過疎化）された状態を示す。B は、本発明に係わる検出器アレイを図解したもので、アレイの能動領域で追加の検出器素子が移植された状態を示す。

【図 22】本発明に係わり、検出器アレイを図解したもので、各カラムが並進軸に沿った z 位置に相対移動した状態を示す。

【図 23】本発明に係わり、一定 z 補間前後、図 23 の検出器アレイから投影された最初と最後のローの投影データの相対的 z 位置を表す。

【図 24】本発明に係わり、検出器アレイを図解したもので、各カラムが並進軸に沿った z 位置に相対移動し引き延ばされた状態を示す。

50

【図 25】本発明に係わり、X線ソースに対してカラム依存型間隔をとる検出器アレイの平面図である。

【図 26】Aは、本発明に係わり、図 21 Aにおけるような標準対称形検出器アレイの斜視図であり、y 軸に対して小さな傾斜角 α で回転する状態を示す。Bは、本発明に係わるAの傾斜型検出器アレイを二次元形式で図示したものである。

【図 27】図 27 Aおよび 27 Bにおけるように傾斜した軸方向扇形の扇形角度 γ と、x y 平面上で測定された対応扇形角 γ_a とを示す。

【図 28】傾斜した軸方向扇形を有する二つの検出器カラムのロケーションと、直立軸方向扇形を生成すべく補間された対応ロケーションとを示す。

【図 29】i 番目ローおよび j 番目カラムにおける直立軸方向扇形のロケーション範囲と、傾斜した検出器アレイの i 番目ローおよび q 番目カラムにある対応検出器とを示す。

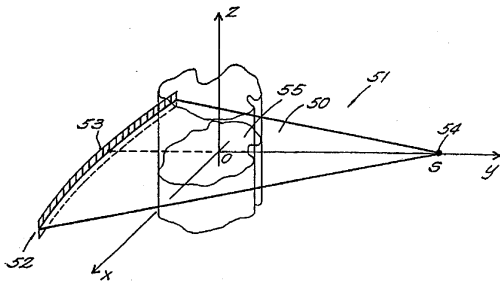
10

【図 30】傾斜した軸横断方向扇形の扇形角 γ と、検出器アレイの円周円筒形幾何学配列を考慮して x y 平面上で測定された対応扇形角 γ_a とを示す。

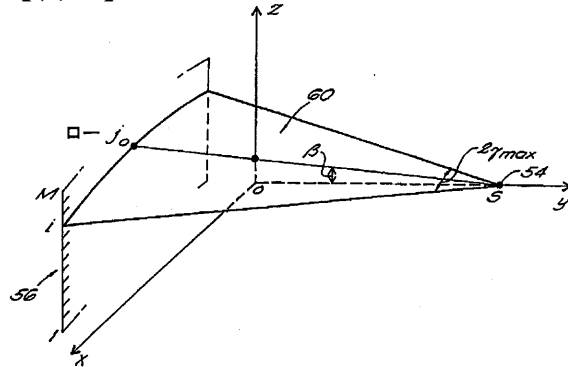
【図 31】直立カラム j と、傾斜した円筒形検出器アレイの i 番目ローおよび q 番目カラムにある検出器との間の三次元幾何学配列および関係を示す。

【図 32】傾斜した円筒形検出器アレイの i 番目ローおよび q 番目カラムにある検出器の z 位置を示す。

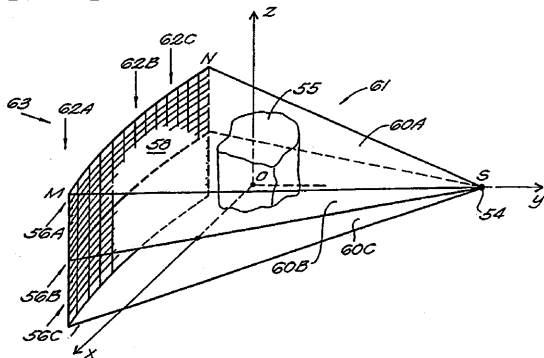
【図 1】



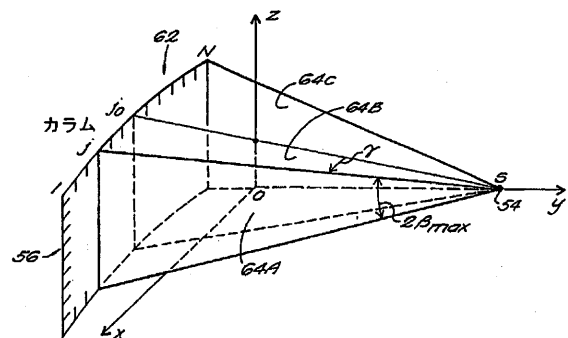
【図 3】



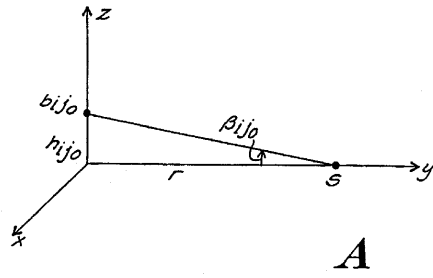
【図 2】



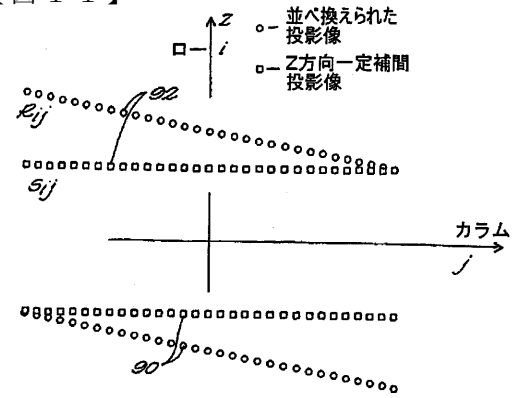
【図 4】



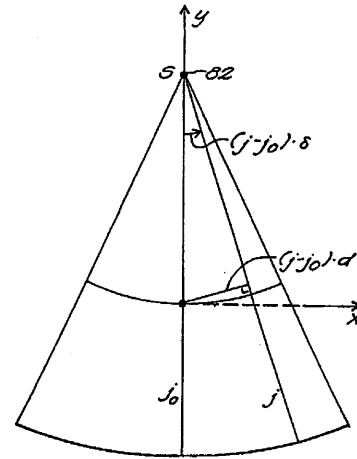
【図 10】



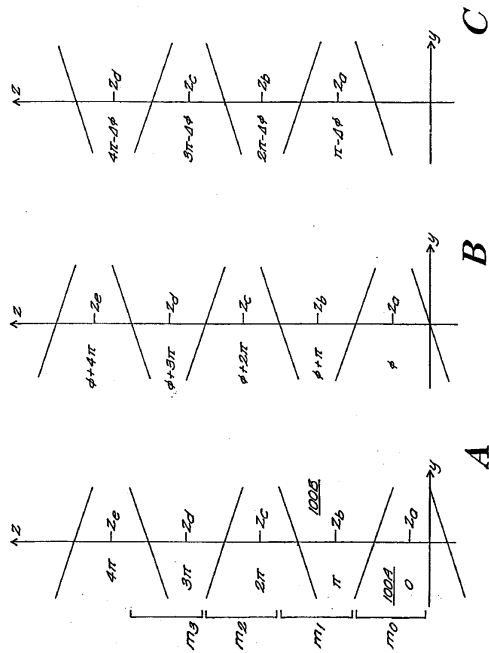
【図 11】



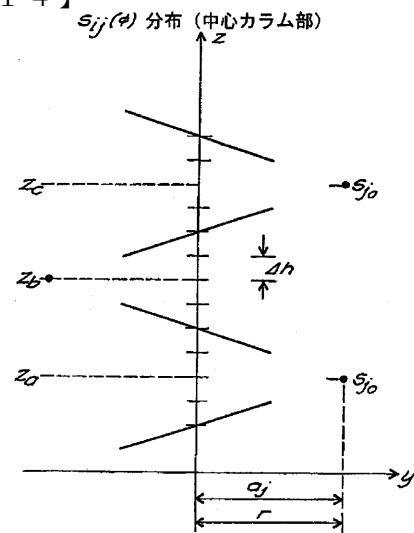
【図 12】



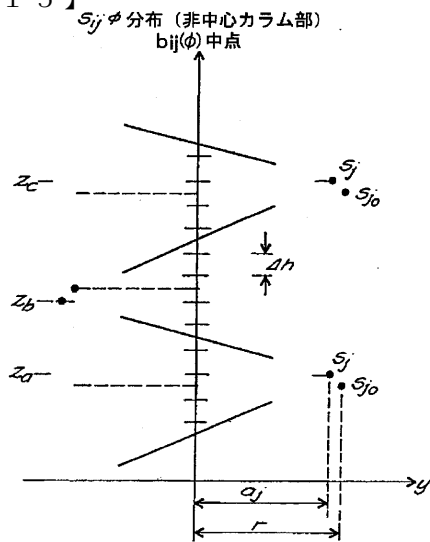
【図 13】



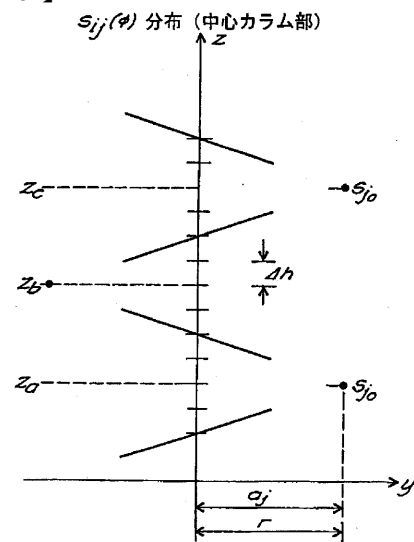
【図 14】



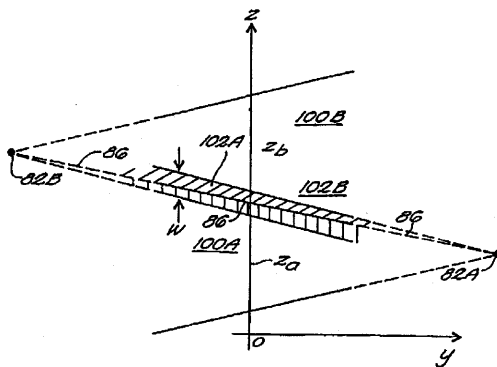
【图 1 5】



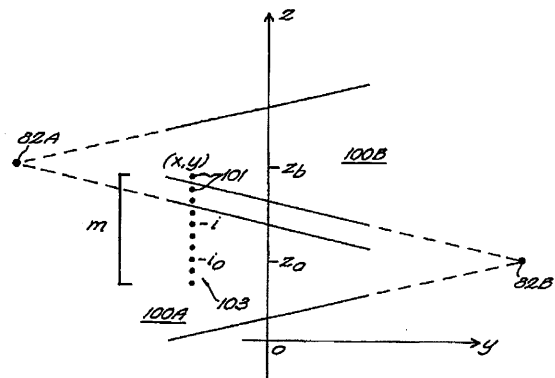
【 図 1 6 】



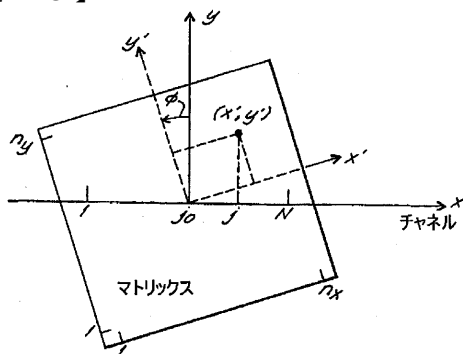
【图 17】



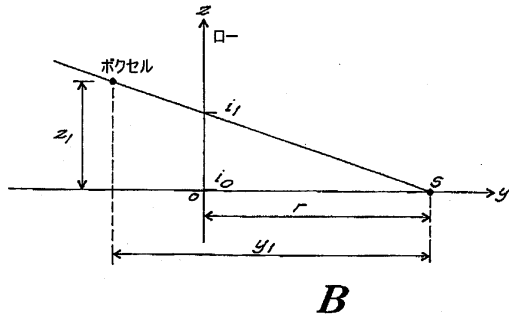
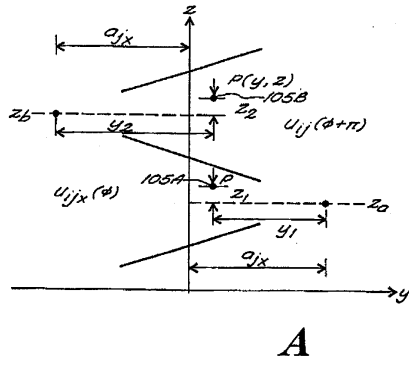
【 図 1 9 】



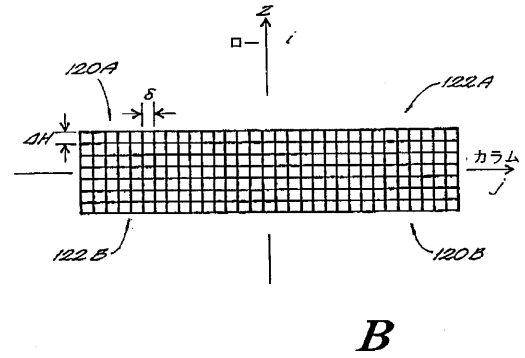
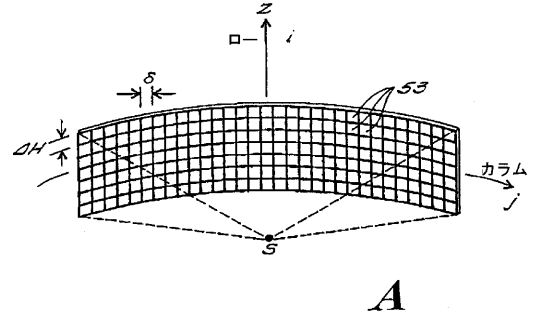
【图 18】



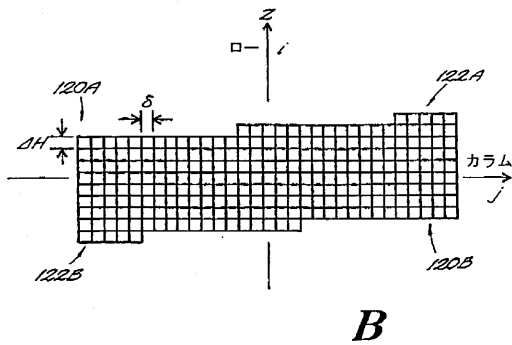
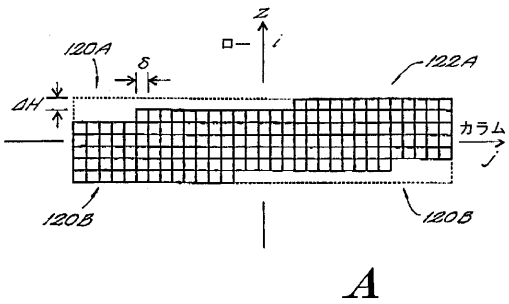
【図 20】



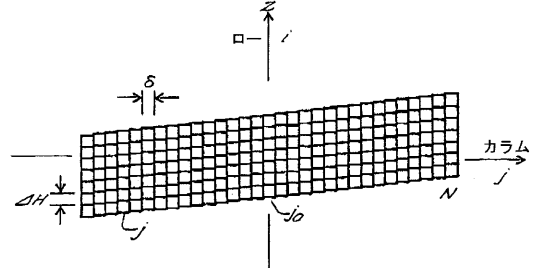
【図 21】



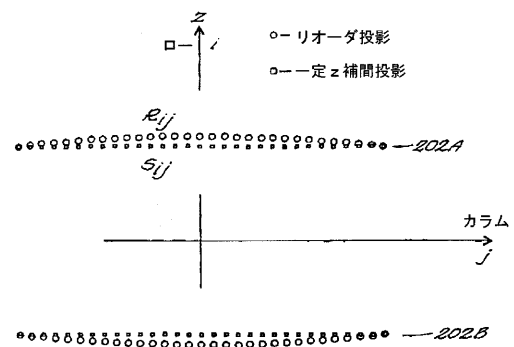
【図 22】



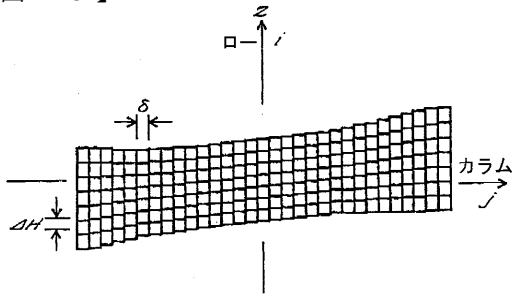
【図 23】



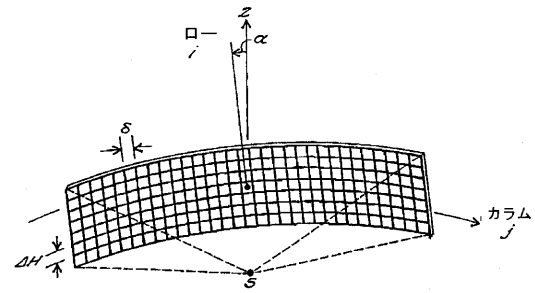
【図 24】



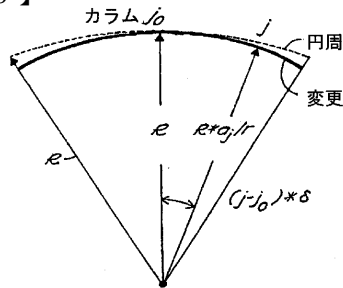
【図 25】



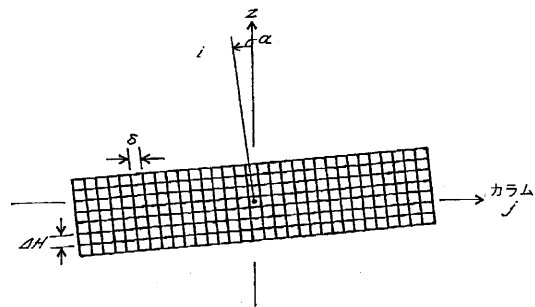
【図 27】



【図 26】

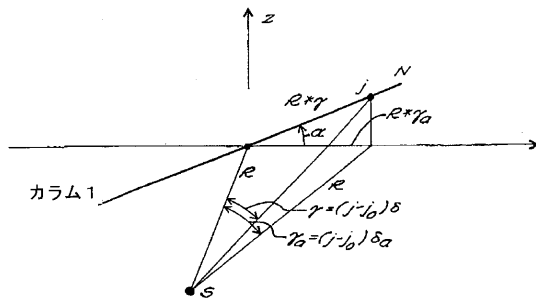


A

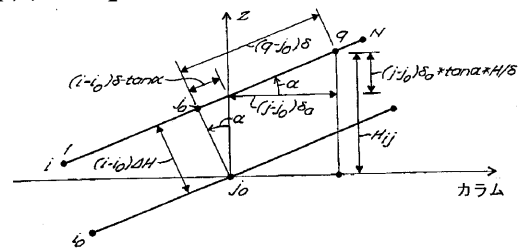


B

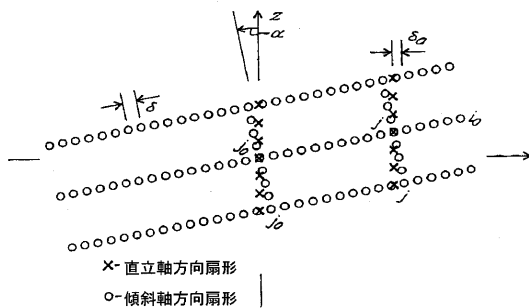
【図 28】



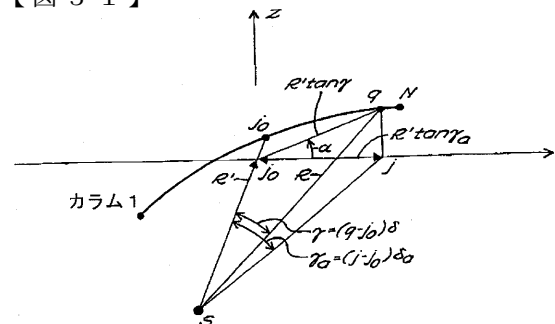
【図 30】



【図 29】



【図 31】



The diagram illustrates the derivation of the Lorentz transformation using a 3D geometric approach. It shows two frames, S and S' , with axes x, y, z and x', y', z' . A point P is shown in both frames, with its coordinates related by the Lorentz transformation. The diagram includes various vectors, angles, and distances, such as the distance $(i-j)\Delta H$ and the angle $\gamma = (q-j)\delta$. The diagram is labeled with points $i, j, k, l, m, n, o, p, q, r, s, t, u, v, w, x, y, z$ and various mathematical expressions.

[illegible]

フロントページの続き

- (74)代理人 100091889
弁理士 藤野 育男
- (74)代理人 100101498
弁理士 越智 隆夫
- (74)代理人 100096688
弁理士 本宮 照久
- (74)代理人 100102808
弁理士 高梨 憲通
- (74)代理人 100104352
弁理士 朝日 伸光
- (74)代理人 100107401
弁理士 高橋 誠一郎
- (74)代理人 100106183
弁理士 吉澤 弘司
- (74)代理人 100101432
弁理士 花村 太
- (74)代理人 100106161
弁理士 竹島 智司
- (72)発明者 ライ, チンーミン
アメリカ合衆国. 01880 マサチューセッツ, ウエイクフィールド, モントローゼ アヴェニ
ュー 34

審査官 安田 明央

- (56)参考文献 特開平08-154926 (JP, A)
特開平10-006702 (JP, A)

- (58)調査した分野(Int.Cl.⁷, DB名)
A61B 6/00-6/14