High Energy X-Ray Computed Tomography for Industrial Applications

Shigeru IZUMI, Hiroshi KAMIMURA, Hiroshi KITAGUCHI, Eisaku MIZUFUNE

ABSTRACT

A high energy industrial X-ray computed tomography system using silicon semiconductor detectors (Si-SSD) and electron linear accelerator (LINAC) was developed to obtain high resolution 3D images of high density and large scale object. To increase photon sensitivity, detector elements were placed parallel to the X-ray beams. The obtained sensitivity of 20% for X-ray of 3MeV was 3×10^4 times higher than that of X-ray films. It was clarified that the photon sensitivity of X-ray detectors restricts the performance of high energy X-ray CT, and it is shown that a CT image of 200mm thick iron object can be obtained with 0.2mm space resolution.

Keywords: X-Ray, Computed Tomography, Electron linear accelerator, Silicon semiconductor detector

1. はじめに

デジタルエンジニアリングの発展に伴い、3D-CAD図面からモノを造ることが一般化し、さらに3D-CAD図面からRP(Rapid Prototyping)により自動的に立体モデルを造る技術も普及しつつある。一方、この逆方向の技術(リバースエンジニアリング)、つまりモノからCAD図面ないしはレプリカを造る技術、あるいはCAD図面とそれに基づいて造ったモノとを照合する技術に対する必要性が増している。これに応える技術が三次元計測技術である。三次元形状を計測する手段は多数あるが、その多くは表面形状に限られる。内部の形状を正確に計測する最も有効な手段はX線CTである。X線CTは試料内部の密度の三次元分布を求めることができ、したがって形状の計測が可能になる。X線CTは医療用の検査手段としてほぼ成熟した技術になっているが、これをそのまま産業用として用いるには性能上の問題点が多数ある。とくに空間分解能が十分でないことと高密度で大型の試料の撮影が困難な点である。X線が最大の透過力をもつエネルギーは、物質によって多少異なるが、およそ数MeVから十数MeVの間にある。透過力が強いことは、材料内での減衰が少ないことであり、厚い試料のX線検査ができることになる。たとえば鉄に対するX線の透過力は約9MeVで最大になり、厚さ10cmを透過したとき約1/10に減衰する。したがって鉄のように高密度でしかも厚い材料を撮影対象とする場合はこのエネルギー領域のX線を利用することで良好な画質が得られる。このエネルギー領域のX線源にはLINAC(電子線線形加速器)がある。LINACを用いると、エネルギーが高いばかりでなく強度も強くなる。したがって高い分解能の画像を得ることができる。一方、高エネルギー

X線は透過力が強いが故に検出が難しいという問題がある。透過力が強いことは、検出器との相互作用も小さく、そのまま透過してしまうからである。たとえば10MeV程度のX線がX線フィルムに当たると、X線光子およそ 10^5 個に1個のみが露光に寄与し、残りの光子はすべて透過する。つまりこのエネルギー領域のX線に対するX線フィルムの量子効率は 10^{-5} 程度の極めて小さい値になる。従ってMeV領域のX線CTを実現する上での最も重要な課題は、いかに量子効率の高いX線検出器を用いるかにある。ここでは、LINACをX線源とし、高い検出効率を実現したシリコン半導体検出器(Si-SSD)をX線検出器とした高エネルギーX線CTの性能とその応用について述べる。

2. 産業用X線CTの概要

2.1 産業用X線CTの性能因子

産業用X線CTには、なるべく良好な画質で、なるべく短時間に、しかもなるべく大きな厚い試料まで撮影したいという要求がある。また鉄などの高密度材料の撮影もできることが望ましい。つまりX線CTは、分解能・撮影時間・鉄換算厚さの三つの因子が性能を決定する。ここで鉄換算厚さとは、どの程度まで厚く密度の高い試料の撮影ができるかを、鉄の厚さで代表して示すものである。これら三つの性能因子は互いに深く関わっており、一つの性能を高くしようとすれば他の性能因子は犠牲にしなければならないという関係にある。これらの性能因子は、検出される試料透過後のX線光子数から統一的に論じることが可能であるがここではその定性的な記述にとどめる。

断層画像はX線のビーム断面積が小さいほど高分解能になる。しかしX線光子数はビーム断面積に比例（場合によっては断面積の二乗に比例）するので、高い分解能では光子数が急激に減少する。検出光子数が少ない場合はその統計的揺らぎが相対的に増大し、画質が劣化する。したがって検出光子数をいかに増やすかに産業用X線CTの課題は集約される。検出光子数を増やすには、X線源の強度を増す、X線検出器の量子効率を増す、露光時間を増すの三つの手段がある。ただし露光時間を増すと撮影時間は長くなり、X線CTの性能が低下することになる。これを避けるには検出器の数を増やして単位時間に採取する透過データ数を増やせばよい。それには検出効率を犠牲にしないで検出器を小さくしなければならない。

2.2 産業用X線CTの装置構成

Fig.1にMeV領域X線CTの構成を示す¹⁾。この装置はX線源としてのLINACと、1次元のX線検出器アレイを対向して配置し、その間に撮影試料を走査するスキャナが設置してある。X線源はファンビーム状にX線を放出するように整形してあり、試料を透過後のファンビームを受ける位置に検出器アレイが設置してある。試料を回転走査しながら透過減衰したX線強度を測定する。前節で述べたようにこの装置の性能はX線源とX線検出器で決まる。

2.2.1 X線源

LINACは高いエネルギーまで電子を加速できるが、X線検査用の線源として用いる場合には、12MeV程度が上限と考えるべきである。これ以上エネルギーを高くしてもX線透過時の電子対生成の増加により、透過力は頭打ちになるし、中性子発生による遮蔽コストが増大するという問題も起きる。X線源として用いるLINACの代表的な仕様をTable 1に示す。photons/ $\mu\text{Sr}\cdot\text{s}$ という単位は、

Table 1 Specifications of typical LINAC for NDI

電子エネルギー	12MeV
X線強度	10^9 photons / $\mu\text{Sr}\cdot\text{s}$
パルスレート	200pps
パルス幅	$5\mu\text{s}$
焦点サイズ	$0.5\text{mm}\phi$

焦点から1m前方の位置での 1mm^2 に毎秒入射する光子数である。表に示す値は非破壊検査で通常用いる300kV程度のX線管のおよそ100倍の光子数である。高い分解能を得るには線源サイズは小さいほど有利だが、この強度の高エネルギーX線を得るには $0.5\text{mm}\phi$ は一つの限界と見なさざるを得ない。これ以上サイズを小さくしようとしても、ターゲットが電子線によって瞬間的に加熱され蒸発を起こす。焦点サイズと光子数から決まる輝度はCo-60などのRI線源の 10^4 ないし 10^5 倍である。

2.2.2 X線検出器

アレイ状に配列したX線検出器と検出器単体をFig.2に示す²⁾。試料を透過したX線は、短冊形のSi-SSD

Fig.2 Schema of X-ray detector element.

Fig.1 Schema of high energy X-ray CT

の小口から長手方向に入射する。この構成により、約40mmのシリコンを透過する間に20%ないし30%の高エネルギーX線光子が検出器と相互作用する。この相互作用の確率、つまりX線に対する量子効率は、X線フィルムのおよそ 3×10^4 倍である。すなわちSi-SSDを使えば、X線フィルムの 3×10^{-5} 倍のX線量で撮影できる。各検出器は互いにタングステン板で遮蔽してあり、これにより検出器相互間のクロストーク（つまり、ある検出器に入射したX線がそこで散乱して隣接する検出器で検出される現象で、画像劣化の原因になる）を防止する。半導体検

出器は小型で狭いピッチでの多数配列ができるので単位時間に多数の透過データが採取できる点でシンチレータよりも有利である。なお最近Si-SSDよりも高い検出効率が得られる化合物半導体（GaAs）のX線検出器も開発されつつある³⁾。これが実用化すれば、MeV領域X線を50%以上の量子効率で検出でき、画質はさらに向上する。

3. X線CTの限界性能

第2章で述べたように、CTの性能は、検出されるX線光子数でほぼ決まる。しかしそこには前提がある。光子数の統計的な変動以外に雑音のないことである。X線検出信号には各種の雑音が混入する。雑音の主なものには、散乱線、クロストーク、検出器漏洩電流、電子回路系の各種ドリフトや電磁雑音などがある。これらをゼロにすることは原理的に困難ではあるが、無視できる程度まで低減することは可能である。無視できる程度とは、光子の統計的揺らぎに比較してこれらの雑音が十分小さいことである。これらの雑音のうち、散乱線は一次元アレイセンサを使う限り無視できる。これは、使用するビーム形状がコーン状ではなくファン状であることが幸いしている。ファンビームの厚さが薄くなれば検出器に入る被検体からの散乱線はゼロに近づく。クロストークは検出器と検出器の間に遮蔽版を設置することで無視できるレベルにすることが可能である。検出器の漏洩電流は検出器自体の性能にとって重要だが、これも現在は、検出されるMeV領域X線光子0.1個に相当する程度まで低減できている。電磁雑音で最も問題になるのはLINACが発生する電磁波であるが、十分な遮蔽により無視できるレベルまで低減できる。これらの雑音のすべてを総合しても現在では検出されるX線光子1個以下に低減することは可能である。従ってX線光子の統計的揺らぎのみが画質決定要因と考えて差し支えない。なお、X線検出にシンチレータと光電子増倍管を組み合わせたり、イメージインテンシファイア（II）のように蛍光体で発生した光を増幅する手段があるが、これらの二次電子増幅や光増幅は、透過したX線光子の統計的揺らぎを増加する方向に働き、低減する機能を持つものではない。これらの増幅は電子回路系の雑音を相対的に低減することが目的である。さて、このようなレベルまで雑音を低減した場合に、どうしても回避できない雑音として残るものがX線光子の統計的ばらつき（揺らぎ）である。この揺らぎは検出できるX線光子数の平方根に比例する。たとえば 10^4 個の光子を検出すれば、その平方根である 10^2 個つまり1%の不確実性が存在することになる。 10^2 個の光子を検出したならばその不確実性は10%になる。この不確実性を低減するには、検出されるX線光子数を増加する以外に手段はない。単位時間あたりの検出光子数を増加する手段には、X線源の強度を増すこととX線検出器の検出効率を増すことの二つ

Table 2. Relation between X-ray photons and beam cross section

ビーム太さ (mm ²)	入射光子数 (s ⁻¹)
0.1×0.1	4×10^5
0.2×0.2	6.4×10^6
0.5×0.5	2.5×10^8
1.0×1.0	1×10^9
2.0×2.0	4×10^9
5.0×5.0	2.5×10^{10}

があり、それ以外にはない。すなわち、X線光子の統計的揺らぎ以外の雑音を十分に低減した装置において、その性能はX線源の性能と検出器の性能ですべてが決まる。Table 1に示した性能のX線源から1mの位置に検出器があるとした場合に検出器に入射する1秒あたりの光子数をビーム断面積（分解能に対応）とともにTable 2に示す。ビーム断面積が0.5mm×0.5mm以上ではX線光子数はビームの断面積に比例するが、0.5mm×0.5mm以下ではその関係が崩れて、0.2mm×0.2mm以下ではビーム断面積の二乗に比例して光子数は急激に減少する。これはX線源の焦点サイズが有限の大きさを持つことにより起こる現象である。焦点サイズがTable 1に示す値より小さくなれば、狭隘ビームの場合の光子数はTable 2の値より増加する。LINACのパルスレートに検出器の数（チャンネル数）を乗じると1秒あたりに採取できるデータ数が決まる。検出器の数を500チャンネルと想定した場合には、1秒あたり 10^5 個のデータが採取できる。画素数を1000×1000とすれば、必要なデータ数は約 10^6 個であるから、約10秒でデータ採取が完了する。つまり撮影時間は10秒になる。ただし先に述べた光子の統計的ばらつきが大きい場合、すなわち高い分解能を要求したり減衰の大きな厚い材料を撮影する場合には、それに応じて撮影時間を長くして画質を保持することになる。これらを考慮すると、Table 1に掲げた仕様のX線源と、500チャンネルの半導体検出器を組み合わせた場合にはTable 3に示すような条件で撮影が可能である。

Table 3. Data acquisition time of CT(s)

		鉄換算厚さ(mm)				
		100	200	300	400	500
分解能 (mm)	0.1	20	-	-	-	-
	0.2	10	10	20	-	-
	0.5	10	10	10	20	-
	1.0	10	10	10	10	100
	2.0	10	10	10	10	20
	5.0	10	10	10	10	10

Photo.1 2D and 3D Images of turbo-charger for automobile.

この表で「-」で示してある箇所は撮影時間が非現実的に長くなり、実用上撮影が不可能なことを示す。鉄換算厚が100mmの場合でも0.1mmの分解能での撮影は光子数が不足し、20秒程度の撮影時間が必要である。とはいえ広い条件範囲で10秒の撮影時間が可能であり、しかも500mmまでの鉄厚（アルミニウムならば1500mm程度まで）の撮影が短時間で可能で、医療用に比較して格段に高い分解能が得られることは、LINACの高い能力と高い量子効率を持つX線検出器により初めて実現できるものである。

4. 高エネルギーX線CTの応用

X線CTにより多断層撮影した結果を三次元表示した例をphoto.1およびphoto.2に示す。これらは6MeVのLINACをX線源とし、断層面上の分解能0.2mm、スライス厚さ1mmの条件で撮影したものである。また立体画像は断層像の5×5の画素を一つの画素に縮退して表示してある。高エネルギーX線CTの利用により、透過厚が1mを越える大型でしかも高密度な試料を、1000×1000ないし3000×3000程度の画素をもつ高分解能な断層像または透過像として撮影できるようになり、その応用範囲は飛躍的に拡大することが期待される。考古学や古生物学の分野では、発掘されたアンモナイトの化石やネアンデルタール人の頭骨の0.1mmの精度を持つ完全な三次元復元画像や、それに基づいて光造形法によって製作された完全なレプリカを世界中の研究者に配布したり博物館に展示することも可能になる。また、自動車などの機械産業では3D-CADが普及しつつあり、設計図とその製造物を三次元空間上で比較することも可能になる。このように数百ないし数千枚の断層写真から3次元画像を計算機上に構築する

Photo.2 2D and 3D Images of tea pot and tea bowl.

ことは、今後の機械系3D-CADの有効活用に不可欠の技術になる。

5. おわりに

高エネルギーX線CTは、その利用が緒についたばかりである。その利用が拡大するに従い、試料の、ある特定の断面一枚の撮影をすることから、数百ないし数千枚の断層撮影により試料全体の立体画像を計算機内に再現することへとニーズが拡大しつつある。この場合には一枚あたりの撮影時間を短くすることがとくに切実な問題になる。撮影時間はX線検出器の数に逆比例するので、なるべく多数の検出器を稠密に配列した方がよい。それには検出器を量子効率を低下せずに小型化しなければならない。この辺の開発課題は未だ残っていると考える。しかし理想的な検出器ができたとしても、それによる改善で向上できる性能は数倍までである。つまりMeV領域のX線CTの性能はその理論的限界に近づきつつあり、今後はむしろ精密な断層像・透過像をいかにうまく利用するかソフトウェアの開発が重要になると考える。

参 考 文 献

- [1] H.Miyai, et.al. ; 1996 Nucl. Sci. Symp., Conference Record Vol.2 pp.816-821(1997)
- [2] H.Miyai, et.al. ; Nucl. Sci. and Meth. A353 pp.97-100.(1994).
- [3] 北口博司 他 ; 日本原子力学会「1998年秋の大会」B42.