

基礎連続講座

CT講座

X線CT装置の機器工学(3)

- ヘリカルスキャンの開発 -

藤田保健衛生大学衛生学部 辻岡勝美

ハンスフィールドによりCTが開発されて以来、CTは画像診断の主役として一時代を築いてきた。しかし、その後、MRIやCRなどの出現により、技術者の興味はそれらの新しいモダリティに移ってしまった時期があった。MRIやCRなどの革新性は誰でも認めるもので、当時はCTからMRIへという雰囲気であった。そのころ、登場したのがヘリカルスキャンであり、ヘリカルスキャンにより新時代のCTの優位性も認められるようになった。いわゆる「CTルネッサンス」である。今回、ヘリカルスキャンの開発とその画像特性、用語について記す。

1. ヘリカルスキャンの開発

1-1 始まりはDRS(dynamic respiratory scan)

われわれの施設ではスリッピング、ニューテート/ローテート方式の連続回転式CT装置「東芝TCT-900S」を使用していた。TCT-900Sは当時としては非常に斬新な装置であり、連続回転スキャンと1回転1秒の高速スキャンが可能であった。

われわれがヘリカルスキャンの開発をするきっかけとなったのが安野、辻本らによるDRS(dynamic respiratory scan)である、これは患者さんに呼吸をさせながら、同時に連続ダイナミックスキャンを行うもので、連続ダイナミックスキャン、高速回転スキャンの利点を利用したスキャン法である。従来、CT検査を受ける場合、患者さんは呼吸停止が絶対条件であった。スキャン中に呼吸をしていてはモーションアーチファクトで良好な画像は得られないというのである。しかし、われわれはスキャン時間1秒(ハーフスキャンならば約0.5秒)の高速回転に注目し、連続ダイナミックスキャンの間に患者が呼吸することを思いついた。われわれの狙いはまんまと的中し、患者の呼吸運動を画像化することに成功した。患者が動いていても診断に十分な画質は得られたのである。

1-2 掟破りのスキャン法

DRSにより「患者が呼吸していても診断に十分な画

像が得られる」と言うことが分かった。ここで思いついたのが、「患者の呼吸ではなく、寝台を動かしたらどうだろう」という考えである。寝台を動かしながらスキャンを行えば、従来の寝台移動、スキャン、寝台移動、スキャンというようなことをせず、連続的にスキャンが行えると考えたのである。当時は「ヘリカルスキャン」「スパイラルスキャン」などという言葉はなく、「テーブルスライディングダイナミックスキャン」と名付けていた。スキャン法どおりの命名ではあるが、今となってはインパクトに欠ける名前であった。

最初のヘリカルスキャンの実験はFig. 1のようなものであった。アルミニウム線のできた胸部血管の模型を手で引っ張ったのである。そのときのCT画像がFig. 2である。若干のモーションアーチファクトは存在するが読影できないというほどでもない。画像再構成の時間間隔を狭くすればどんどん画像ができる。補間も何もない時代の世界初のヘリカルスキャン画像である。

ヘリカルスキャンは、「患者が移動しながらスキャンを行う」、いわゆるCTにおける「掟破りのスキャン法」であった。しかし、得られた画像を手にすると、その臨床的な利点は問題点を超越するものと想像された。実際、スキャン中に患者は動いてはいけないと言いつつ、呼吸停止できない場合でもスキャンは行っていたわけではあるし、第一、心拍を停止することはできない。

2. ヘリカルスキャンにおける投影データの補間処理

実際にヘリカルスキャンが普及した原因として補間方法の開発が大きい。ヘリカルスキャンでは画像再構成のための1回転のX線管の軌跡はらせん軌道となり、その「始め」と「終わり」では異なった投影データとなる。これがモーションアーチファクトの原因である。そこで開発されたのが補間方法である。ヘリカルスキャンにおける補間は、このようなX線管のらせん状の軌跡から従来スキャンのような軌跡を求めるものである。補間により従来スキャンのような完結した軌跡が得られれば、あとは通常の画像再構成を行うだけ



Fig. 1 最初のヘリカルスキャンの実験(1987年11月17日) アルミニウムでできた肺の模型を手で引っ張った。こんな簡単な実験からヘリカルスキャンは始まったのである。

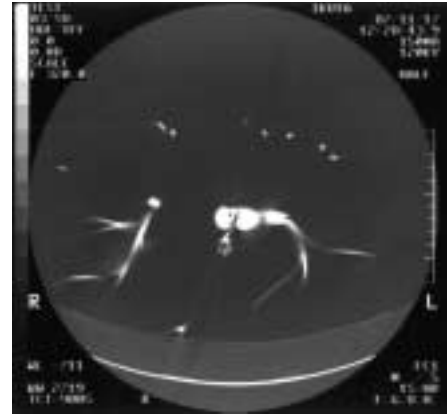


Fig. 2 最初のヘリカルスキャン画像 補間も何もしていない画像であるが、なんとか読影は可能である。ヘリカルスキャンの短時間性、画像の連続性を確認できた画像である。

である。時々「補間再構成」という言葉が使われることがある。しかし、「補間をした再構成」ではなく、「補間をしてから再構成」であるので、補間再構成は誤解を招くかもしれない。補間の時点では再構成など行っていない。補間により、再構成のための正しい投影データを作り出しているのである。

まず始めに開発されたのが360度補間と呼ばれるもので、2回転分の投影データが利用される。目的の断面の画像再構成に利用される投影データは2回転分、つまり二つの投影データの位置による重み付けで得られる(Fig. 3)。この方法では、画像再構成されたスライス厚が厚くなるという問題があった。その反面、利用する投影データが2回転分であることから画像ノイズの低下という利点もあった。

360度補間の画像のスライス厚が厚くなる問題を解決するために開発されたのが180度補間である。これは対向データ補間とも呼ばれる。360度補間では透過X線は扇状(ファンビーム)でまとめて考えられていた。しかし、これを個々の検出器窓に入射するペンシル状のビームで考えてみる。こうすると、目的のX線の軌跡を作り出すのに対向データを利用できることに気がつく。回転中心の1点の補間には1回転分の投影データがあればよい。しかし、FOV全体で考えた場合、1回転にファン角度を加えた分の投影データが必要となる(Fig. 4)。

180度補間において注意すべきはオフセットディテクタ配置である。従来のスキャン法ではX線管1回転の間でのデータ量を増加させるために検出器の配置は中心から窓幅の1/4だけずらして配置されていた。Q-Q配置である。これが、180度補間では同一とみなして補間が行われる。若干の空間分解能の劣化が起こ

る。これに対処する技術として、「ヘリカルQ-Q」と呼ばれる補間法も開発されている。

3. 展開図による画像再構成の理解

ヘリカルスキャンにおける補間法の理解は、画像特性を知るうえで重要である。しかし、Fig. 3やFig. 4で示したように、その方法は立体的であり、紙面で表すのには困難であるともいえる。そこで利用されだしたのが「展開図(スキャンダイヤグラム: scan diagram)」である。これは、円筒状に描かれたらせん軌道のある位置で切り開いたものである。展開を用いれば立体的なX線管の軌跡を平面で考えることができる。シングルスライスCTならまだしも、マルチスライスCTとなつてはX線データの軌跡は非常に複雑になり、展開図なしでは容易な理解は不可能となる。

Fig. 5は展開図により360度補間を示したものである。目的断面の画像再構成を行うための投影データは垂直であり、この投影データを斜めの投影データから重み付け補間により求める。目的断面に近いデータは係数が大きく、目的断面から遠いデータは係数が小さい。利用される投影データはX線管の2回転分である。X線管が2回転する間に軌跡は体軸方向に広がる。ヘリカルピッチが大きいほど、移動量は大きく、スライス厚は厚くなる。X線管2回転分の投影データが補間に用いられることは、それだけ画像ノイズが小さくなることも理解できる。

Fig. 6は展開図により180度補間を示したものである。X線管の軌跡(実データ)と180度位相をもって対向データが描かれる。補間は実データと対向データを用いて行われる。この展開図ではFOVの中央(X線管の回転中心)についてのものである。もし、FOVの中

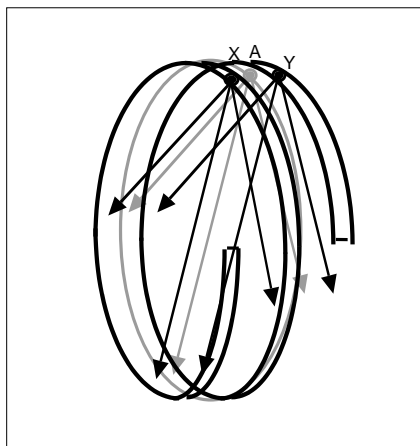


Fig. 3 360度補間
 360度補間には目的とする投影データと同じ方向の実際の投影データであるXとYが用いられる。投影データAは投影データXと投影データYの直線補間により得られる。目的断面の360度方向についてこのような投影データを作成すれば、目的断面の画像再構成が可能となる。360度補間ではらせん軌道2回転分が必要となる。

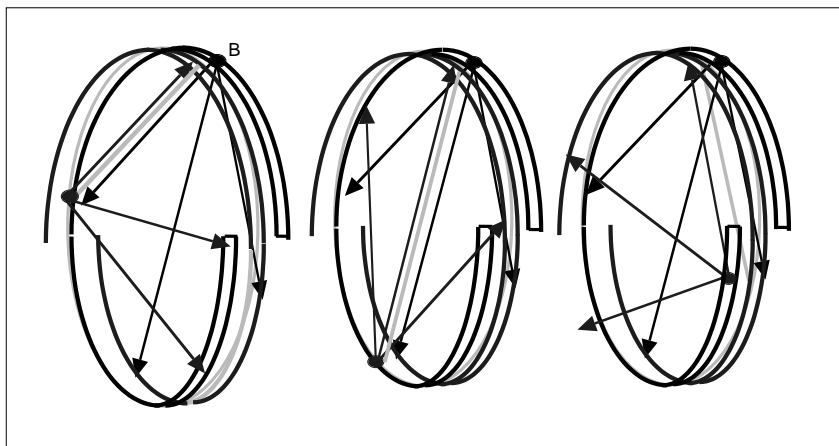


Fig. 4 180度補間
 360度補間では扇状ビーム(ファンビーム)について補間が行われていたが、180度補間(対向データ補間)では各検出器窓に向かう一本一本のX線ビームについて補間が行われる。これにより、利用される投影データは目的断面の両側、180度+ファン角度で合計360度+2×ファン角度となる。180度補間では360度補間に比べて実効スライス厚の増加が少なくなる。

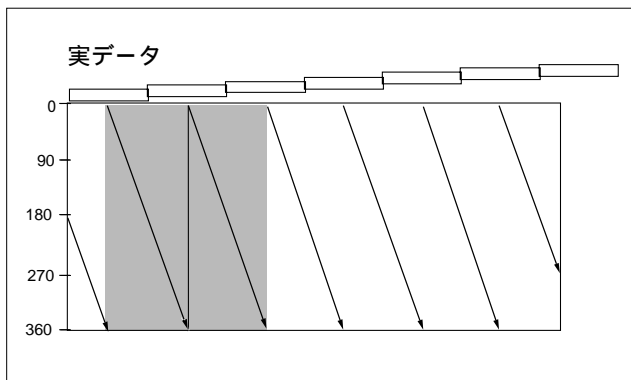


Fig. 5 展開図(360度補間)
 縦軸がX線管の回転角度、横軸が体軸方向の位置となる。投影データは斜めの直線になる(FOV中央の場合)。目的断面の画像再構成のための投影データは実際の投影データの直線補間により作られる。

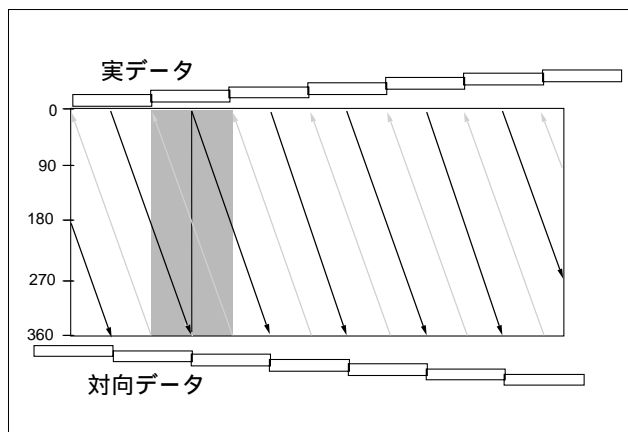


Fig. 6 展開図(180度補間)
 180度補間では実際の投影データ(実データ)のほかに、180度の位相差を有する対向データが利用される。目的断面の投影データは実データと対向データにより作成される。ただし、ノイズは実データの利用量のみで決定される。

央以外の点について知ろうとすれば、データの軌跡は斜めの直線に正弦データを加えたものになる。

4. ヘリカルスキャンのための新しい用語

ヘリカルスキャンのような新しいスキャン法の場合、従来の用語だけでは表現が困難な場合が出てくる。以下に、ヘリカルスキャンにより利用される用語を記す。

4-1 体軸方向(Z-axis)

従来のCTでは一枚一枚の断面についての議論が成

されていた。ヘリカルスキャンの登場によりCTは三次元的な用語の利用が必要となった。画像再構成により得られるCT断面をスライス面方向(X-Y方向)と呼び、それと直交する方向を体軸方向(Z軸方向)と呼ぶようになった。

4-2 ノンヘリカルスキャン(non helical scan)

ヘリカルスキャンが開発されて以来、それまでのスキャン方法は従来スキャンと呼ばれてきた。らせん軌道スキャンに対して円軌道スキャンと言う意味である。ただし、従来スキャンと言うのもどうであろう

か。いつから見ての従来だろう。第1世代のスキャン法は第3世代から見れば従来スキャンである。最近ではヘリカルスキャンに対して「ノンヘリカルスキャン(non-helical scan)」という呼び方が一般化している。

4-3 ヘリカルピッチ(helical pitch)

スライス厚(ビームのコリメーション)に対する1回転あたりの寝台移動距離である。ヘリカルスキャンによるらせん軌道をバネと見なせば、バネの伸び具合のようなものである。ヘリカルピッチが大きければスキャンは短時間で終了することができる。その反面、ヘリカルアーチファクトは増加し、後述する実効スライス厚も増大する。ヘリカルピッチが小さければ、従来のノンヘリカルスキャンと同等の画像が得られるが、ヘリカルスキャンの短時間性の利点は減少し、被曝の面でも問題が残る。一般に、シングルスライスCTによるヘリカルスキャンではヘリカルピッチ2.0以下にすべきであり、それ以上であるとヘリカルアーチファクトの発生が問題となる。実際にはヘリカルピッチは1.5程度にとどめるべきであろう。

4-4 スライス感度プロフィール(SSPz: slice sensitivity profile at Z-axis)

これは従来のノンヘリカルスキャンでもスライス厚測定時に用いられてきたものであるが、ヘリカルスキャンの登場により重要な評価項目となった。ヘリカルピッチを変化させることにより、スライス感度プロフィールは変化するのである。スライス面における空間分解能の測定でもスライス感度プロフィール(SSP: slice sensitivity profile)と呼ぶこともあり、この場合は体軸方向の意味も含めSSPz(slice sensitivity profile at Z-axis)と呼ぶことが一般的である。

4-5 実効スライス厚(effective slice width)

従来のノンヘリカルスキャンではスライス厚はコリメーションとビームトリマだけで決定されていた。しかし、ヘリカルスキャンではヘリカルピッチを変化させることにより画像のスライス厚は変化する。従来は、コリメーション=画像のスライス厚として捉えてきたものを、コリメーションと画像のスライス厚を分けて考える必要が出てきた。そこで登場したのが実効スライス厚である。コリメーションを設定スライス厚という場合もある。

4-6 体軸方向の空間分解能

画像評価の重要な要素として空間分解能がある。従来のノンヘリカルスキャンでは空間分解能といえば1枚のCT画像中の空間分解能(X-Y平面における空間分

解能)について評価されていた。体軸方向はといえばスライス厚の評価のみであった。ヘリカルスキャンの登場により体軸方向のデータ数(画像枚数)は飛躍的に増加し、体軸方向の空間分解能も行われるようになった。その評価法はX-Y面方向と同様にMTFで表される。

4-7 ヘリカルアーチファクト・ステアステップアーチファクト

ヘリカルスキャンでは補間処理により発生するアーチファクトの低減が可能となった。しかし、ヘリカルピッチの増大によりアーチファクトは完全には消し去ることができない。これは、ヘリカルスキャンによる画像を用いて三次元表示を行ったときに顕著に現われる。三次元表示の表面に階段状の模様が出現することからステアステップアーチファクトとも呼ばれる。

5.ヘリカルスキャンの画像特性

ヘリカルスキャンでは補間法により異なった特性を示す。また、ヘリカルピッチによっても画像特性は変化する。360度補間では実効スライス厚の増加が問題となるが、画像ノイズは低下する。180度補間では従来のノンヘリカルスキャンとほぼ同等の実効スライス厚、画像ノイズとなる。ヘリカルピッチを増加させると実効スライス厚は厚くなる。しかし、シングルスライスCTにおいて、ヘリカルピッチの増加は画像ノイズに影響を与えることはない。

6.ヘリカルスキャンの臨床的メリット

ヘリカルスキャンによる臨床的效果として、「短時間性」と「画像の連続性」が挙げられる。

6-1 短時間性

従来のノンヘリカルスキャンではスキャンと寝台移動が繰り返されていた。ヘリカルスキャンでは検査中に患者寝台は一定速度で移動を行い、検査時間の短縮が可能となる。

従来、肺野や腹部のCTでは何回も呼吸停止を行っていたのに対し、ヘリカルスキャンでは1回の呼吸停止で全肺のスキャンも可能である。これは微小な病巣が毎回の呼吸停止の違いで検索困難となることを防止できる。

また、造影剤注入を伴ったCT検査では、造影剤使用量の低減、造影効果の増大が可能となる。従来と同様の造影効果を求めるならば、短時間で注入すればよいのだから造影剤使用量は低減でき、従来と同量の造影剤を使用するならば、短時間注入により注入速度は

増加し、結果的に造影効果の増大となる。

6-2画像の連続性

ヘリカルスキャンのもうひとつの利点として画像の連続性がある。従来のノンヘリカルスキャンではX線管の回転した回数だけ画像が得られていた。ヘリカルスキャンでは長いらせん状の軌跡の何処からでも画像再構成が可能であり、多くの画像を再構成することができる。ただし、この場合、一枚一枚の持つスライス厚はコリメーション、ヘリカルピッチによるもので、画像再構成間隔を細かくすることによりオーバーラップした画像が得られる。

画像の連続性はCT画像の三次元表示の実用化をもたらした。CT画像の三次元表示技術は従来から開発されていたが、多くの連続した画像が必要とされるため、日常的に行うことは困難であった。しかし、ヘリカルスキャンによって三次元表示は広く利用されるようになった。良好な三次元画像を得るための条件として、CT画像の実効スライス厚が薄いこと、連続性に優れた多数の画像が用意されていることが挙げられる。そのため、ヘリカルスキャンでは薄いコリメーシ

ョンでヘリカルピッチを小さくスキャンを行い、画像再構成間隔を狭くする必要がある。

7.ヘリカルスキャンから始まったこと

ヘリカルスキャンの登場は画像診断に大きな影響を与えたものと言われている。従来のノンヘリカルスキャンでは離散的な横断像のみで診断が行われていたのに対し、ヘリカルスキャンの登場により三次元的な診断が行われるようになった。診断方法もCRTモニター上で動画として観察したり、MPR(multi planer reconstruction)により任意の断面を表示して観察することも可能となった。画像数の増加も著しいものである。読影方法、PACSなどにも大きな影響を与えた。ヘリカルスキャンの開発から10余年でマルチスライスも登場した。これらすべてが「旋破りのスキャン方法」から始まったのである。

次回は「X線CT装置の機器工学(4)-マルチスライスCTの開発-」

参考文献

- 1)岩井喜典, 斎藤雄督, 今里悠一: 医用画像診断装置 - CT, MRIを中心として - . コロナ社, (1991).
- 2)瓜谷富三, 岡部哲夫: 医用放射線科学講座13 - 放射線機器工学 - . 医歯薬出版, (1998).
- 3)辻岡勝美: CT自由自在. メジカルビュー社, (2001).
- 4)日本放射線技術学会専門委員会X線CT装置性能評価検討班 (速水彰男, 他): X線CT装置の性能評価に関する基準(案). 日本放射線技術学会誌, 47: 56-63, (1991)
- 5)日本放射線技術学会学術調査班(花井耕造): ラセンCTの物理的な画像特性の評価と測定法に関する報告. 日本放射線技術学会誌, 53-1714-1732, (1997)