

CT 画像再構成法の変遷

檜垣 徹 広島大学大学院先進理工系科学研究科

近年のCT装置の発展はめざましく、多列検出器CTに始まり、面検出器CT、高精細CT、そしてフォトンカウンティング検出器CTと、進化の一途をたどっている。ソフトウェアに着目しても、広く利用されていたフィルタ逆投影法 (filtered back projection: FBP) から逐次近似再構成法 (iterative reconstruction: IR)、そして深層学習応用再構成法 (deep learning based reconstruction: DLR) と、目まぐるしい変化が見られる。本稿では、変遷するCTの画像再構成法に着目し、その分類を改めて整理し、原理や画質の特性について解説する。

狭義の画像再構成法

CT撮影によって最初に得られるデータは、サイノグラムと呼ばれる投影空間のデータである。サイノグラムから実空間のCT画像に変換するプロセスを画像再構成法と呼ぶ。昨今の画像再構成法では、データの空間を変換に加えて、ノイズ低減や線質効果補正など、付随的な処理を組み合わせたものが一般的である。ここで、データ空間を変換する処理のみを指したものを「狭義の画像再構成法」、一連の処理を組み合わせたものを「広義の画像再構成法」と定義し、まずは以下で、狭義の画像再構成法の原理や特徴について解説する。

1. フィルタ逆投影法

FBPは、撮影時のX線のパスに沿ってサイノグラムを逆投影することで断面画像を得る再構成法で、シンプルな処理であることから広く利用されている。

逆投影する際にフィルタ関数 (再構成関数、再構成カーネルなどと呼ばれる) を用いてボケを抑制し画質を調整することから、フィルタ逆投影法と呼ばれる。FBPは簡便で処理が高速という特徴を有するが、X線のビーム形状や検出器の画素サイズなどは考慮されず、さまざまなモデル簡略化が織り込まれている。また、FBPにはノイズを低減する仕組みが含まれないことから、特に低線量撮影においては何らかのノイズ低減処理を組み合わせる必要がある。

2. 逐次近似再構成法

IRは、FBPと同様に、逆投影に基づく画像再構成法であるが、再構成関数はいずれ、また、再構成した画像が妥当であるかを評価し、反復的な処理で画質を改善する仕組みを有する。再構成した画像が撮影対象を忠実に表しているかを直接確認する術はなく、サイノグラム同士を比較することで間接的に評価する。すなわちIRでは、撮影対象をCTスキャン (= 順投影) したサイノグラムと、再構成した画像を順投影 (= 仮想CTスキャン) したサイノグラムを比較することで、再構成した画像が正確であるかどうかを判断する。両者の差分を最小化するように逐次的に処理することから、逐次近似再構成法と呼ばれる。仮想CTスキャンの処理において、X線ビームの形状や検出器画素サイズ、線質効果現象など、さまざまな物理モデルを反映することができ、撮影対象を正確に画像化することができる一方で、処理時間が長くなるという特徴を有する。また、IR自体には画像ノイズを低減する仕組みは

含まれておらず、現実的なノイズを含むサイノグラムに適用する場合は、ノイズ低減処理を組み合わせる必要がある。

3. 深層学習応用再構成法

深層学習の応用が広がって以降、深層学習を用いた画像再構成法が開発された^{1), 2)}。狭義のDLRは、サイノグラムとそれに対応する断面画像を教師に学習することで、変換関数を近似することができる。教師データ次第でさまざまな特性を獲得できる可能性を秘めるが、最適化すべきパラメータ数が多く、一般的には計算コストが高いことから、まだまだ発展の余地があるだろう。

広義の画像再構成法

広義の画像再構成法は、前述の狭義の画像再構成法にさまざまな付随的な処理を加えた一連の処理を指すものと定義する。すなわち、さまざまなCTメーカーが発表・発売し、臨床で使用されている画像再構成法は、すべて広義の画像再構成法に該当する。したがって、広義の画像再構成法はCTメーカーごとに独自の処理となっており、一概にくくすることは難しいが、それぞれの方法の一般的な概念について解説する。

1. フィルタ逆投影法

広義のFBPは、狭義の再構成処理に加えて、線質硬化補正などアーチファクトを低減するためのさまざまな処理が組み合わされている。前述のとおり、FBPにはノイズ低減処理が別途必要となることから、図1に示す量子フィルタを組み