

論文の内容の要旨

論文題目 肝血管構築の評価における逐次近似法による
新世代CT画像再構成の臨床的有用性について

氏名 松田 出

背景と目的：

multi detector- row computed tomography (MDCT) は体軸方向に多数の検出器を有する CT 装置で、短時間に広範囲、より薄いスライスでの画像収集が可能である。従前使用されていた single detector computed tomography と比較して飛躍的に撮影速度が高速になり、同時に頭尾方向の空間分解能 (スライス厚) の顕著な改善をもたらした。MDCT による isovoxel な画像データを利用した高画質な再構成画像や三次元画像は従来よりも画質、診断能に優れ、軸位断画像だけではわかりにくい立体的位置関係や、骨や血管などの特定の組織の抽出、画像化に大きく寄与している。三次元画像再構成の一手法として volume rendering (VR) があるが、VR 画像ではスライス厚が薄いほど画質が良好であり診断能に優れることが知られている。しかし VR 画像の重要な特性として、コントラストが低い、あるいは小さい構造の描出が悪く、ノイズの多い画像では画質が低下してしまう。つまり低コントラスト構造を VR 画像に再構成するのは技術的に難しく、できるだけノイズが抑制された元画像を用いて再構成を行うことが望ましい。

線量と画像ノイズの間には次式に表される、相反する関係があり被曝低減の試みは即ちノイズの増加に不可避に結びついている。この基本的な関係は

$$\text{image noise} \propto \frac{1}{\sqrt{\text{radiation dose}}}$$

に表される比例関係である。CT 画像再構成法としては filtered back projection (FBP) が長い間汎用されて

きた。FBP は「2次元画像の全方向からの投影が得られれば、解析的に元の画像を復元できる」という Radon の定理に基づいているが、その計算過程では X 線が被写体を透過し検出器に到達する確率分布、ポアソン分布に基づくデータのばらつきがそのまま画像に反映され上式の関係から逃れられない。

FBP のような解析的なアプローチの他に、CT 撮影においてある投影が得られた場合、最も可能性の高い元の画像の濃度分布を見出すという統計的なアプローチが存在する。つまり CT 画像のすべてのピクセル値をベクトル \mathbf{x} 、得られた投影データをベクトル \mathbf{y} とした場合に、 \mathbf{y} のもとで \mathbf{x} となる確率 $P(\mathbf{x}|\mathbf{y})$ を最大にするような $\hat{\mathbf{x}}$ を求める。

$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \max_{\mathbf{x}} P(\mathbf{x}|\mathbf{y})$$

対数をとっても確率の最大値をとる \mathbf{x} は変化せず、条件付確率を考慮すると

$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \max_{\mathbf{x}} \{ \log P(\mathbf{y}|\mathbf{x}) + \log P(\mathbf{x}) \}$$

を求めればよいことになる。ここで右辺第一項の近似

$$\begin{aligned} \log P(\mathbf{y}|\mathbf{x}) &\approx -\frac{1}{2} \sum_i d_i (y_i - [A\mathbf{x}]_i)^2 + f(\mathbf{y}) \\ &= -\frac{1}{2} (\mathbf{y} - A\mathbf{x})^T D (\mathbf{y} - A\mathbf{x}) + f(\mathbf{y}) \end{aligned}$$

を用いると次のような評価が可能になる。ここで d_i は光子カウント数、 y_i は光子カウント数の入射光に対する割合を示す。行列 A は画像を投影に変換する forward projection、 D は d_i を対角成分に並べた行列である。結果として

$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \min_{\mathbf{x}} \left\{ \frac{1}{2} (\mathbf{y} - A\mathbf{x})^T D (\mathbf{y} - A\mathbf{x}) + U(\mathbf{x}) \right\}$$

を評価し、求めることで当初の目的が達成できる。ここで $U(\mathbf{x})$ は $\log P(\mathbf{x})$ を評価する関数である。この関数を各変数に対して最大化するような処理を繰り返して行うことで逐次的に画像を得る手法であり逐次近似法と呼ばれる。逐次近似法では画像データから投影データを推定する forward projection の過程が必要になる。この forward projection、数式上の A には X 線光子が被写体を通過する過程を考慮して物理的に精密なモデルを採用することができる。しかしこのような光学的モデルに基づいた forward projection は計算量が多く、iteration が行われるため繰り返し計算により所要時間はさらに増大する。そこで forward projection では物理的な過程を省略して iteration により統計的な解を求めるのみに絞った手法がまず初め

に導入され、そのうちのひとつとして adaptive statistical iterative reconstruction (ASIR) がある。また光学的モデルを再現した逐次近似法もごく最近、臨床現場に導入されており、そのうちのひとつとして model based iterative reconstruction (MBIR) がある。ASIR や MBIR に代表される逐次近似法は従来法 FBP よりもノイズの抑制に優れ、等線量での画質の向上や同等の画質での線量低下が期待されている。

肝臓内の血管解剖を正確に把握することは肝臓外科手術には必須の要件であり、特に腫瘍に対する肝部分切除や生体肝移植のドナー手術においては極めて重要である。特に生体肝移植のドナー手術では肝門脈、肝静脈の分岐構造の画像による把握が重要である。肝血管構築を三次元再構成画像で表示すると一覽性に優れ解剖学的構造の立体的な把握が容易となる。肝門脈の分岐や肝静脈の支配領域の variation は肝切除の計画に大きな影響を与える事柄であり正確で簡便な評価が望まれる。

本研究の目的は逐次近似法を肝門脈、肝静脈の VR 三次元再構成に応用し、その有用性を検討することである。

方法：

基礎的検討として、FBP、ASIR、MBIR の線量-ノイズ関係をファントムを用いて検討した。FBP、ASIR、MBIR の各再構成法を用いたファントム画像上の均一部分の画像ノイズを測定した。両対数グラフを利用して線量-ノイズ関係を調べた。

臨床的検討では 16 例の腹部造影 CT 画像を FBP、ASIR、MBIR でそれぞれ再構成し VR 画像を作成した。各再構成群間で VR 画像作成時間の比較を行った。また肝門脈、肝静脈、肝実質の CT 値と、肝門脈、肝静脈の肝実質に対する contrast-to-noise ratio (CNR) を測定し、比較した。主観的画質評価は 2 人の読影者により独立に、門脈、肝静脈の各分枝と肝全体について、それぞれ 3 段階評価でスコアリングし各群の比較を行った。

結果：

基礎的検討では画像ノイズは FBP > ASIR > MBIR であった。線量とノイズを両対数グラフで示す (図 1)。FBP と ASIR ではノイズは線量の $1/2$ 乗に比例していたが MBIR では約 $1/4$ 乗に比例していた。この結果 MBIR は特に低い線量域で相対的に強いノイズ抑制効果を発揮すると考えられた。通常の撮像で 200 mAs 前後が使用されることが多く、その程度の線量設定では MBIR と ASIR の客観的画像ノイズの差は小さかった。

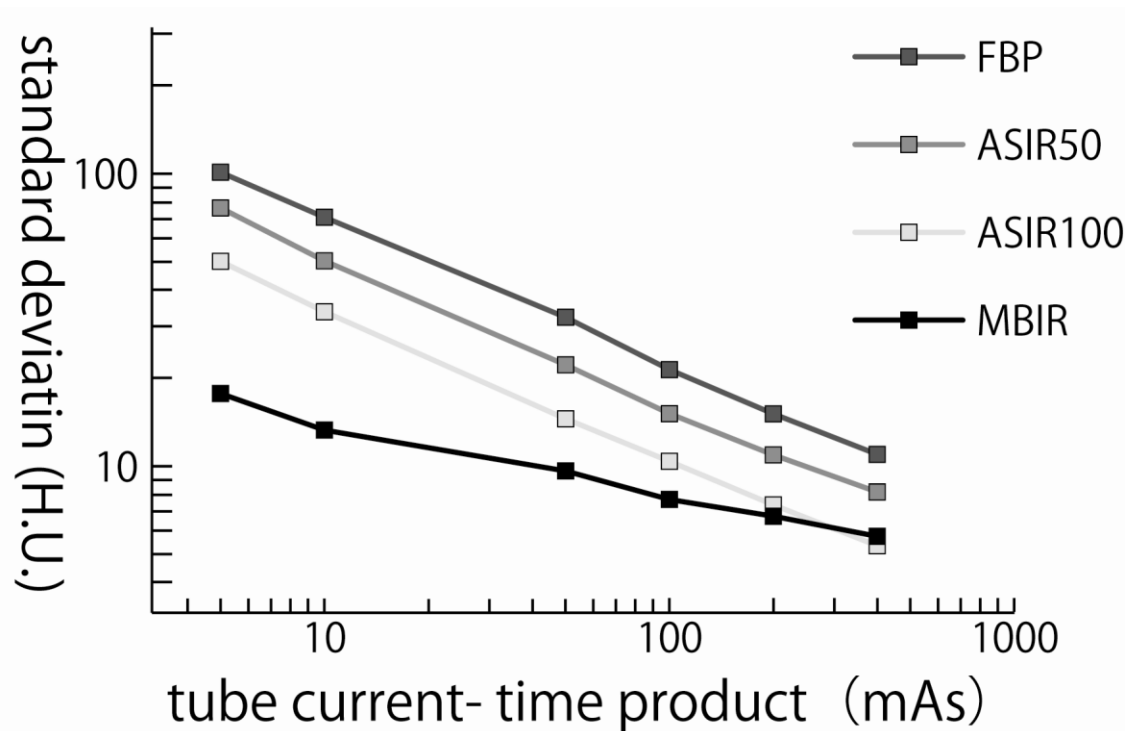


図1：線量に対する画像ノイズの各再構成法での変化。両対数グラフ。

臨床的検討では ASIR と MBIR は CT 値を変化させずに画像ノイズを低下させ、門脈、静脈の CNR を改善した。VR 画像の作成時間は FBP と比べて有意に短縮した。主観的画質評価では $FBP < ASIR \leq MBIR$ の関係が見られ ASIR、MBIR は FBP と比べて有意に画質が改善した。ASIR と MBIR の比較では、ノイズ低減効果の客観的な指標である CNR には有意差はなかった。主観的画像評価においても差に有意差は一部を除いて見られなかった。しかし評価の傾向は $ASIR < MBIR$ であり実際の画質は MBIR の方が優れている可能性が示唆された。客観的指標であるノイズだけでは捉えられない画質の差が存在すると考えられた。

結論：

ASIR、MBIR の肝門脈、静脈の VR 三次元再構成画像への応用を試み、通常線量撮影での肝門脈、静脈の VR 画像への逐次近似法の応用の有用性を明らかにした。逐次近似法を肝血管構築の評価へ応用すると、従来の FBP に比して画質改善効果が見られ有用性が高い。MBIR は ASIR と比較して画質評価が高い傾向があったが有意差はなかった。