

Parallel Imaging の基礎

町田好男

株式会社東芝医用機器・システム開発センター

はじめに

パラレルイメージング (parallel imaging, 以下 PI) は, 複数の RF コイルを用いて並列的にデータを取得することで, 撮像時間の短縮を可能とする MRI の高速撮像技術の総称である. その歴史は, 80 年代後半の基礎的研究にまでさかのぼる (Carlson '87, Kelton '89 他). 90 年代初頭には, Carlson らは専用コイルを用いてデータを取得し k 空間で不足データを充てんする手法を用いて, また Ra らは感度マップを作成し実空間で直接逆マトリクス演算を行う手法を用いて, 実際にファントム画像を取得した^{1),2)}. その後, Sodickson らの SMASH 法³⁾や Prussmann らの SENSE 法⁴⁾が, それぞれ k 空間手法と実空間手法の発展形として提案され, これらの研究を機に一気に臨床 PI への流れができて現在に至っている. 90 年代半ばに, MRI の一連の周辺技術 (アレイコイル, 高速演算可能な計算機, 洗練されたシーケンス制御技術) が成熟度を増していたことが, この流れを加速する大きな原動力となったと考えられる.

パラレルイメージングの原理

様々な PI 手法のうち, 実空間手法^{2),4)}が, 現在, 最も臨床応用に供されているといえよう. この方法では, RF コイルの感度の違いをもつ実空間そのもので処理を行うため, 直感的

にも理解しやすい. 簡単に説明するため, 「2 倍速撮影」を考える (Fig. 1 参照). 初めに, 位相エンコード (PE) データを 1 ラインごとにスキップ収集することにより「ハーフ FOV」画像を得る. 撮影時間は半分であるが画像は PE 方向に折返しを伴い, 各チャンネルごとに作成した画像は実空間の 2 点から発生した信号をコイルの感度で重み付け加算したものになっている. この関係は単純な 1 次式である. チャンネル数だけこの 1 次式が得られるので, 連立一次方程式を解く「展開」処理により, 折返しのない「フル FOV」画像が得られる.

この展開処理によって生成された PI 画像の SN 比, SNR^{PI} は, 標準撮影画像の SN 比, SNR^{full} を用いて次のように表される⁴⁾;

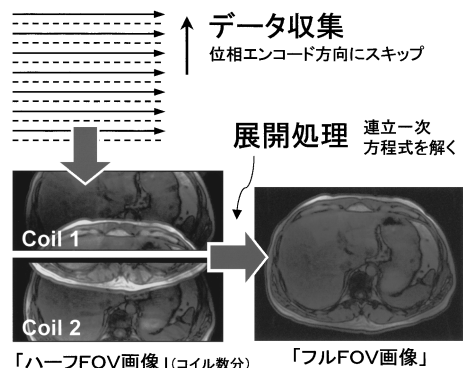


Fig. 1. Principle of parallel imaging (image domain method)

キーワード parallel imaging, multiple RF receiver, fast imaging

$$SNR^{PI} = SNR^{full} / (g\sqrt{R})$$

ここに、 R (reduction factor) はデータ収集数の減少率を表す (撮影の倍速率でもある). g は g ファクタ (geometric factor) と呼ばれる $g \geq 1$ なる量で、展開を行う点間におけるコイル感度の独立性が高いほど小さい. 例えば、PE 方向と要素コイル配列が同方向であれば、感度の大きさの独立性が大きくなり、良好な PI 展開になることはよく知られている (g ファクタは小さい). 以下本稿では、これまでの解説等^{5),6)}であまり説明の見られない、感度の位相成分の展開への寄与について説明する.

感度の位相成分の展開への寄与

MR 信号は、静磁場の方向 (z とする) に直交する x - y 面の複素数ベクトルとして扱うことができるが、RF コイルの感度も同様である. すなわち、各要素コイルの高周波磁場の向きに沿ったベクトルを実数成分とみなした複素 MR 信号を観測すると考えることができる (Fig. 2(a)). (式表現では MR 信号値にこのベクトルの共役複素数を乗じたことに相当する.) 点 A と B でのスピンの大きさと向きが同じでも、コイルから見た観測値は大きさはもちろん位相も異なる. 次に、Fig. 2(b)を用いて展開処理を考えてみたい. X_1, X_2 を展開すべき2点とし、この2点が図のように二つの要素コイルに対して対称位置にあるとしよう. 感度の大きさは同じになるが、特に位相がお互いに直交している点としてみよう. Fig. 2(b)の 45° 方向のスピンを元に考えると、位相まで考慮した感度マトリックス S の成分 S_{ij} は、 ± 1 と $\pm i$ で表現できる. (Fig. 2(c)). 実はこの行列は、最も独立性のよい「直交行列」になっている (g ファクタもその定義より 1 になる). こうして位相項のみによって展開可能となっているシ

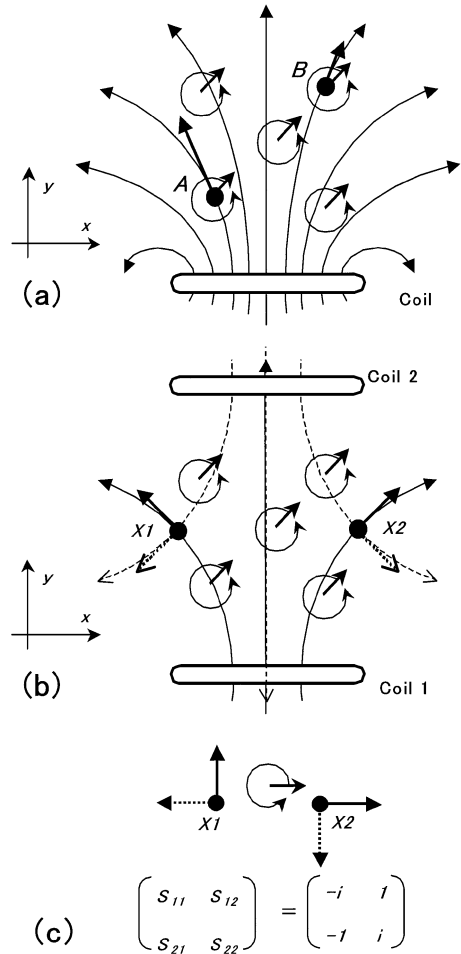


Fig. 2. Contribution of phase information of sensitivity in PI unfolding processing. Details are described in the text.

ンプルな実例が得られるが、実践における理解の上でも参考になると思われる.

パラレルイメージング対応 RF コイル

さて、上記の g ファクタは展開処理対象となる点間の感度から決まるので、撮影断面、

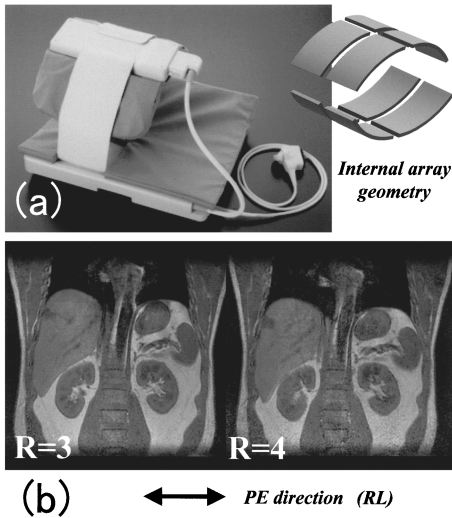


Fig. 3. (a) 8-channel QD torso array coil for PI. (b) Coronal images with R of 3 and 4 in RL direction.

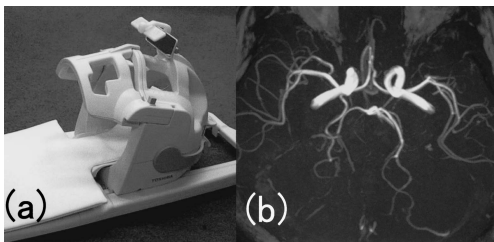


Fig. 4. (a) 7-channel QD head array coil for PI. (b) MRA image with R of 2.

FOV, 倍速率などの撮影条件に依存する。また、上の説明のように特定の一点でなく対象領域全体で考えなければならない。そのため、PIに対応したRFコイルの設計にあたっては、要素コイル間干渉の低減やSNRの向上などハードウェアとしての特性改善のほかに、実臨床での使用条件もこれまで以上に考慮する必要がある。現在こうしたPI対応型コイルの開発が急ピッチで進んでいる。Fig. 3に体幹部コイルの実例を示した⁷⁾。このコイルは、要素コ

イルを3方向に配することで任意断面PI撮影を可能としており、さらに、3ないし4倍速での coronal 展開 (PE は左右方向) も可能である。実際、この撮影条件に対応した g ファクタは小さく上述の位相項も展開に寄与していると考えられる。Fig. 4は頭部コイルの実例である。

おわりに

パラレルイメージングPIの基礎について、本テキストとしては特に位相項の効果について述べた。PIは、傾斜磁場系の強化による撮像の高速化と異なり、原理的にはすべてのパルスシーケンスに適用できるため、MRIの特長であるコントラスト分解能をそのまま生かせる。今後もさらなる発展が期待される高速化手法といえる。

参考) 各社のPI呼称：東芝：SPEEDER, Philips：SENSE, GE：ASSET, Siemens：iPAT.

文 献

- 1) Carlson JW, Minemura T: Imaging time reduction through multiple receiver coil data acquisition and image reconstruction. *Magn Reson Med* 1993; 29: 681-688
- 2) Ra JB, Rim CY. Fast imaging Method Using Multiple Receiver Coils with Subencoding Data Set. In Proceedings of the SMRM 10th Annual Meeting, 1991; 1240
- 3) Sodickson D, Manning WJ: Simultaneous acquisition of spatial harmonics (SMASH): fast imaging with radiofrequency coil arrays. *Magn Reson Med* 1997; 38: 591-603
- 4) Pruessmann KP, Weiger M, Scheidegger MB, Boesiger P: SENSE: Sensitivity encoding for fast MRI. *Magn Reson Med* 1999; 42: 952-962
- 5) Sodickson D. Parallel Imaging: A Signal-Space Perspective. Syllabus of ISMRM Weekend Educational Course, 2002; 557-584

- 6) Pruessmann KP. Parallel Imaging : The Image Domain Perspective. Syllabus of ISMRM Weekend Educational Course, 2002 ; 585-590
- 7) Okamoto K, Hamamura Y, Machida Y. Torso Ar-ray Coil with Eight QD-Surface Coils for Parallel Imaging. In Proceedings of the ISMRM 10th Annual Meeting, 2002 ; 859

Technical Basis of Parallel Imaging

Yoshio MACHIDA

*Medical Systems R & D Center, Toshiba Corp.
1385 Shimoishigami, Otawara, Tochigi 324-8550*

The technical feature of parallel imaging (PI) is described in this text. In particular, the role of phase sensitivity in PI unfolding post-processing is discussed.