

論文内容の要旨

論文題目 Radial Sampling を用いた高速 MRI 撮像法の開発

氏 名 米山 隆一

核磁気共鳴現象を利用して生体断面の撮像を行う MRI は、現在までに多大な成功を収めてきた。しかし、装置の機械的性能が向上した現在でも、標準的な撮像法で一箇所当たり 3-5 分程度の撮像時間を要し、その高速化は大きな課題となっている。

この MRI 撮像の高速化については現在迄に Echo Planer Imaging (EPI)、Spiral EPI 等のシーケンス、half Fourier 法等の画像再構成法、Sensitivity Encoding (SENSE) 等のデータ収集法といった諸法が考案されている。これらの撮像法は総て、シグナル/ノイズ比 (S/N) の低下、アーチファクトの出現、解像度の低下といった何らかの代償を伴って、目的とする撮像時間の短縮を実現しているが、これは Nyquist の定理が存在する以上避け難いことである。

本論分では、新たな高速撮像法として、従来高速撮像法に用いられてきた Radial サンプリングをベースとして、Radial Echo Planer Imaging with Central High Resolution Area (REPI[7] with CHRA) [8]を初めて考案した。Radial サンプリングは、従来高速撮像法に用いられてきたが、k-space の中心部でオーバーサンプリング (Nyquist の定理で要請される密度を超えてサンプリングすること) が生じる為に、k-space の辺縁部でアンダーサンプリング (Nyquist の定理の要請する密度以下でサンプリングすること) によるアーチファクトの発生を防ぐ為には、標準的な Cartesian サンプリングに比べて、 $\frac{\pi}{2}$ 倍の scan が必要になると言う欠点があった。今回考案された REPI with CHRA は、再構成後の画像

において FOV の辺縁部での解像度を犠牲にすることで、上記の Radial サンプリングの欠点を補って撮像時間を短縮しつつ、FOV の中心部での高い解像度を維持することで、画像の診断能力を保つものである。

上記の REPI with CHRA を解説するに先立ち、筆者は、REPI with CHRA のベースとなる Radial サンプリングについて、サンプリング方式に固有のアーチファクトの性質及び動きによるアーチファクトの性質を、解析的手法及びコンピューターシミュレーションを用いて、Cartesian サンプリングの場合と比較しつつ示した。これにより、Radial サンプリングの動きによるアーチファクトに対する頑健性が示された。

その後筆者は、REPI with CHRA の scan 法、再構成法について詳述した。REPI with CHRA は、Fig.1 で示される通り、multi-shot EPI による Radial サンプリングをベースに、各々の scan の最初の view (以下 long view) を他の $n-1$ 個の view (以下、short view) の n 倍の範囲でサンプリングするものである。これによって scan する view の長さが短縮されることで、1回の励起で scan 出来る view の数は n 倍となり、撮像時間を

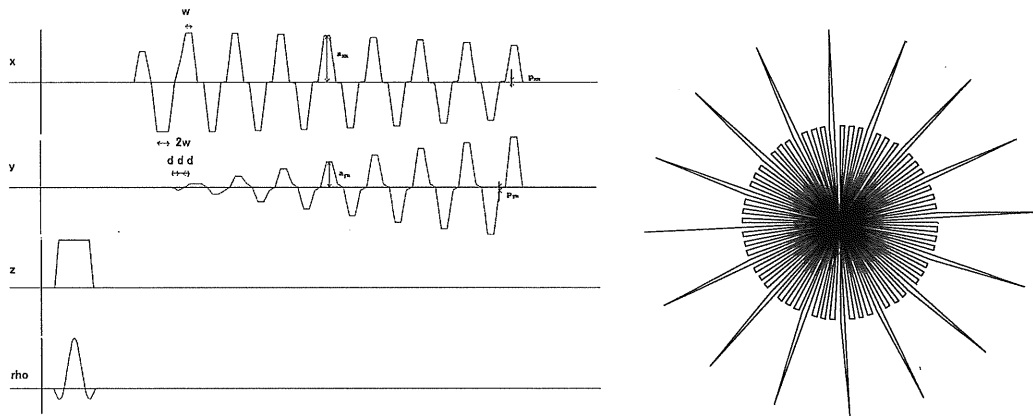


Fig.8 (a)REPI with CHRA のシーケンス

(b) REPI with CHRA の trajectory

$1/n$ に短縮する事が出来る。しかし、この状態では、long view のサンプリング密度は Nyquist の定理の要請する密度の $1/n$ であり、そのまま再構成すると、アンダーサンプリングによる強い streaking アーチファクトを生じる。REPI with CHRA は、これを防ぐ為に、筆者の考案した再構成法 (以下、CHRA 再構成法) を適用することで、FOV の中心部で高解像度を保ちつつ辺縁部は低解像度だがアーチファクトが少ない画像を得るものである。尚、REPI with CHRA は Radial サンプリングをベースとして考案されたが、Cartesian サンプリングにも適用可能であり、この場合は EPI with CHRA となることも同時に示した。

REPI with CHRA について詳述した後筆者は、EPI with CHRA / REPI with CHRA の理論的実現可能性を示す為に、レゾリューションファントムを EPI with CHRA / REPI with CHRA で撮像し、コンピューターによって、T2-decay の影響を排除した上で、再構成を行い、この画像を、スタンダードな EPI / REPI によって得られた高解像度画像 (FOV=24cm Matrix=256x256) 及び低解像度画像 (FOV=24cm Matrix=64x64) と比較した。比較の結果、EPI with CHRA / REPI with CHRA の何れに於いても、画像の中心部において、スタンダードな EPI / REPI によって得られた高解像度画像と同様の鋭い変化を示し、辺縁部に於いては、スタンダードな EPI / REPI によって得られた高解像度画像で認められたアーチファクトが減少する事が示された。又、スタンダードな EPI によって得られた (a) 高解像度画像、(b) 低解像度画像、(c) EPI with CHRA によって得られた画像のそれぞれについて point spread function の first zero crossing point を求めた結果、(a) 0.94mm (1 pixel)、(b) 3.8mm (4 pixel)、(c) 0.94mm (1 pixel) となり、EPI with CHRA によって FOV の中心部で高解像度が達成されている事が、定量的に示された。スタンダードな REPI によって得られた (a) 高解像度画像、(b) 低解像度画像、(c) REPI with CHRA によって得られた画像のそれぞれについても同様に point spread function の first zero crossing point を求めた結果、(a) 1.4mm (1.5 pixel)、(b) 4.2mm (4.5 pixel)、(c) 1.4mm (1.5 pixel) となり、REPI with CHRA によっても FOV の中心部で高解像度が達成されている事が、同様に定量的に示された。尚、スタンダードな REPI、REPI with CHRA で得られた画像は、スタンダードな EPI、EPI with CHRA で得られた画像と比較して信号強度の均一性が悪かった。これは、Radial サンプリングが磁場の不均一性に弱いことによるものであるが、ここで認められた濃度の不均一は他の文献で認められたものより強く、筆者のソフトウェア技術の問題であると考えられる。

この様にして EPI with CHRA / REPI with CHRA の理論的実現可能性が示された後、筆者は、FOV 中心部で振動する円盤の像を REPI with CHRA で撮像した像を、コンピューターシミュレーションを用いて示した。シミュレーションの結果、辺縁部に streaking アーチファクトは出現したが、対象そのものの位置は正確に認識され、Radial サンプリングの動きによるアーチファクトに対する頑健性が、REPI with CHRA に於いても保たれている事が示された。

その後筆者は、T2 の影響を排除することなく、REPI with CHRA を用いてレゾリューションファントムを撮像し、スタンダードな REPI によって得られた高解像度画像 (FOV=27cm Matrix=256x256) 及び低解像度画像 (FOV=24cm Matrix=64x64) と比較した。比較の結果、T2-decay の影響下でも REPI with CHRA によって、FOV の中心部で高解像度を保ちつつ辺縁部は低解像度だがアーチファクトが少ない画像を得られる事が示されたが、一方で、REPI with CHRA に於いては、FOV 中心部と辺縁部の信号強度の差が強く出る事が明らかとなった。これは FOV 中心部の再構成は各励起の 1 番目の view のみ が用いられるのに対して、他の部分の再構成に用いられる 2 番目以降の view からの信号は、

時を追うにつれて T2-decay によって減衰する為である。この補正は今後の検討課題である。

最後に筆者は、REPI with CHRA を用いてボランティアの頭部及び骨盤を撮像し、スタンダードな REPI によって得られた高解像度画像(FOV=27cm Matrix=256x256)と比較した。この結果生体撮像に於いても中心部で高解像度を保ちつつ辺縁部は低解像度だがアーチファクトが少ない画像を撮像できることが示されたが、一方でレゾリューションファントムの撮像時に認められた FOV 中心部と辺縁部の信号強度の差は、生体撮像に於いても認められた。又、REPI with CHRA により得られた画像では、スタンダードな REPI によって得られた画像で認められた susceptibility アーチファクトが少ない事が示された。

以上により、ファントムによる実験、シミュレーションによる実験、及び in vivo でのボランティアによる実験を通じて、REPI with CHRA によって中心部で高解像度を保ちつつ辺縁部は低解像度だがアーチファクトが少ない画像を撮像できることが示された

尚、REPI with CHRA は、TrueFISP、3D Radial サンプリング、SENSE、partial Fourier 法や といった他の高速撮像法との組み合わせが可能であり、これらの実現は今後の課題である。又、MRI angiography、MRI fluoroscopy、高速 functional MRI と言った高速撮像の実際の応用についても、今後の検討が望まれる。又、臨床応用の場においては、頭部等の動かない対象については、一端低解像度の画像を取ってモニタリングした後、必要な部位を追加的に高解像度で撮像するといった応用法が可能であり、今後の検討が望まれる。