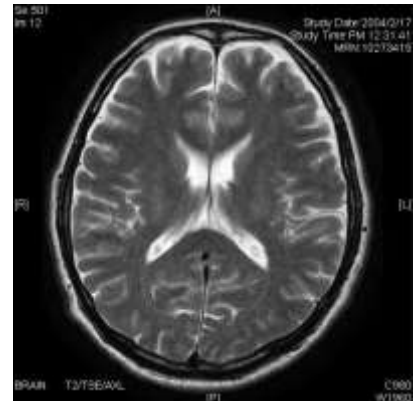


## 脳の接続性研究を改善する

### はじめに：

ウィスコンシン医科大学（MCW）は、脳の領域間で信号が伝達される方法である脳の接続性を研究するために国立衛生研究所から助成金を受けています。この助成金により、研究者は機能的結合磁気共鳴画像法（fcMRI）の新しい技術を開発します。脳の接続性は、急速に拡大している神経科学の新興分野です。統合失調症、アルツハイマー病、パーキンソン病などの一部の疾患では、脳の接続性が重要な指標であると考えられています。



### いくつかの定義：

磁気共鳴画像法（MRI）は、詳細な内部構造を視覚化する医療画像技術です。MRIは核磁気共鳴（NMR）の特性を利用して、体内の原子核を画像化します。MRIマシンは強力な磁場を使用して体内のいくつかの原子核の磁化を整列させ、RF磁場を使用してこの磁化の整列を変更します。これにより、核はスキャナーで検出可能な回転磁場を生成します。この情報は、スキャンされた身体の領域の画像を作成するために記録されます。磁場勾配により、異なる位置にある原子核が異なる速度で回転します。異なる方向の勾配を使用することにより、2D画像または3Dボリュームを任意の方向で取得できます。

機能的磁気共鳴画像法（fMRI）は約15年間存在しています。これは、血流に関連する変化を検出することにより脳の活動を測定するMRI手順です。これは、脳細胞が使用するエネルギーに関連する血流の変化を画像化することにより、人間または動物の脳内の活動をマッピングするために使用される特殊な脳および身体スキャンです。この10年間で、この技術を使用する革新的な方法が開発されてきました。

この方法である機能的接続（fcMRI）は、被験者が休んでいる間に脳の領域がどのように相互作用するかを測定する方法で最近人気を集めています。生まれつきの機能的な脳の接続性を測定できることで、特定のタスク中にアクティブな一連の領域がネットワークと見なされるほど接続されているかどうかを知ることができます。その後、将来どの脳領域と一緒に活動する可能性が高いかを予測できます。これは、各脳領域の性質と、それが私たちの行動の根底にあるニューロンネットワークにどのように貢献しているかをより深く見る動機になります。

MRI物理学のk空間は、測定中のMR画像の2Dまたは3Dフーリエ変換です。その複雑な値は、パルスシーケンス、つまり正確なタイミングのRFパルスシーケンスによって制御されるMR測定中にサンプリングされます。実際には、k空間は多くの場合、データ収集中にデジタル化されたMR信号からのデータが格納される一時的な画像空間、通常はマトリックスを指します。スキャンの最後にk空間がいっぱいになり、データが処理されて最終画像が生成されます。磁気共鳴システムは、テスラで生成できる最大磁場の観点から評価されています。1テスラ（T）は10,000ガウスに相当し、これは地球の磁場の20,000倍に相当します。ボクセルは、3次元空間のグリッド上の値を表すボリューム要素で

す。これは、ビットマップの 2D 画像データを表すピクセルに似ています。ボクセルは、一定間隔の 3 次元グリッド上の単一のサンプル、つまりデータポイントを表します。

### MCW での仕事：

ウィスコンシン医科大学での仕事は特定の目的である場合、単一の体積エコー平面イメージング (EPI) データセットの取得に必要な時間を短縮することです。脳全体の研究では、これらのデータセットの時間セットは必須。fcMRI で使用される方法論には、シードボクセル静止状態時間経過と他のボクセル時間経過の相互相関が含まれます。

原則として、ボクセルの時間経過のペア間で形成される可能性のあるすべての相関係数に関心がある可能性があります。理想的には、すべてのタイムコースを同時に取得して、脳全体の安静状態の変動の一貫性を維持します。実際のテストでは、現実的な目標を設定して 2 秒未満の時間で全脳データセットを達成することにより、この要件を緩和できます。部分的な k 空間 EPI を使用することで、データ収集を高速化できます。これにより、単一の画像で取得する必要がある部分的な k 空間ラインの数が削減されます。同様に、エコー時間 (TE) を短くすることができ、これにより信号のドロップアウトを最小限に抑えることができます。この時間は、面内感度エンコーディングを使用することでさらに短縮できます。これらの方法では、データの収集に使用される時間が短くなるため、S/N 比が低下します。

脳などの組織のボリュームをカバーするための 2D MR 画像のマルチスライス収集は、通常、一度に 1 つのスライスを進めます。一度に 2 つ以上のスライスを取得することで、取得時間を短縮できます。この目標を達成するために、MCW の研究者は、各スライスの個別の位相タギングを使用してマルチスライス励起 RF パルスを設計し、取得したデータの重複スライスを解く方法を開発しました。マルチスライス収集を使用すると、収集された信号が増加し、SNR が改善されます。この作業は、全身励起コイルと軸対称の 32 チャンネル受信専用コイルを使用した GE Signa EXCITE 3 T MR スキャナーで実行されました。RF パルスは、他の外部機器を必要とせずに GE スキャナーによって形成されました。

## 信号処理 :

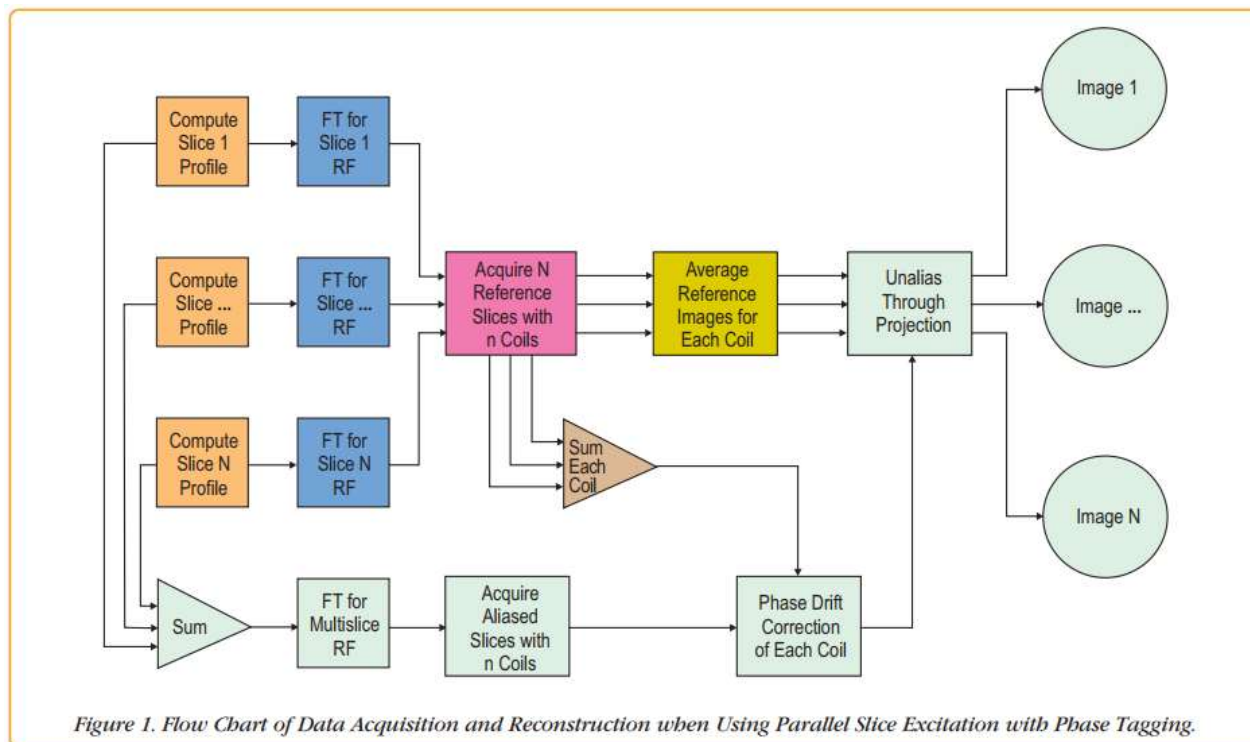


Figure 1 は、マルチスライスアクセラレーション方法の概要を示しています。画像形成へのパスは、フローチャートの緑色のブロックで示されます。このパスに沿って3つの重要なイベントがあります。

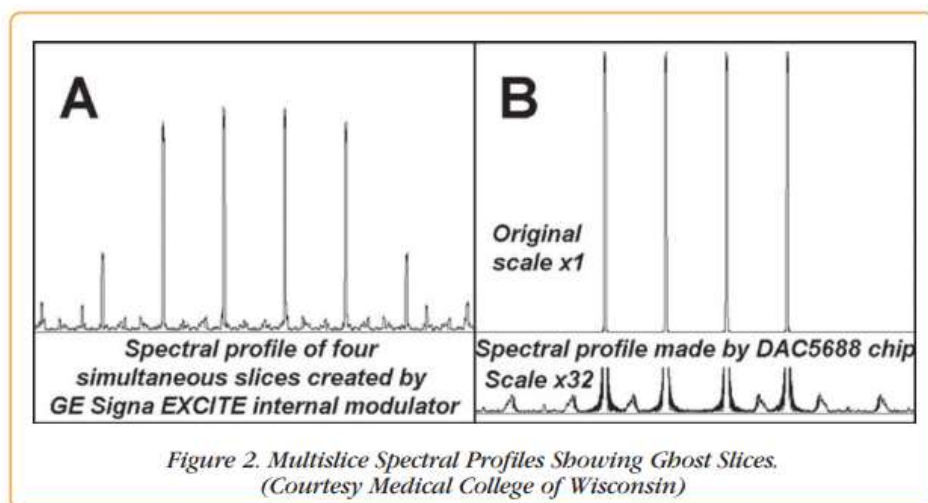
- マルチスライス RF パルスによる励起
- 位相シフト補正
- プロジェクションによるエイリアス解除、またはエイリアスの除去

図の接続された青とオレンジの正方形の列は、RFパルスの形成に関係しています。N個の個々のスライスの位置とRF位相が決定され、スライスグループの単一励起周波数を想定してフーリエ変換（FT）が計算されます。基準スライスの場合、これらのパルスは独立して使用されます。エイリアススライスの場合、N個のスライスプロフィールを合計し、合計のFTを計算することにより複合パルスのFTが計算されます。

最も重要なブロックは赤で表示されています。n個のRFコイルアレイごとに、スライスNごとに短時間の参照画像が取得されます。最初のいくつかは破棄され、残りの画像はSNRを改善するために平均化されます。したがって、利用可能な良好なSNRを持つN x n個の参照画像があり、N個のスライスのそれぞれにn個あり、それらは複素数値画像です。最後に、「プロジェクションによるUnalias」というラベルの付いたブロックに到達します。エイリアス化されたボクセルごとに、n個のチャンネルのそれぞれから複素数値が存在します。さらに、参照画像は、そのボクセルのN個のスライスとn個のチャンネルからのエイリアスなしデータを提供します。特異値分解は、ボクセルごとに線形方程式系を解くために使用されます。このプロセスでは、チャンネル全体でデータが結合され、N個の非エイリアススライスが生成されます。

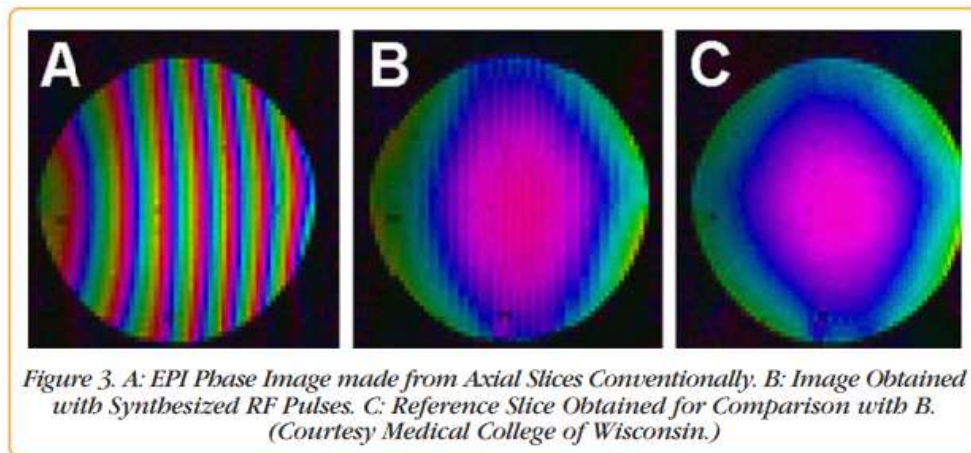
## Pentek 接続 :

GE スキャナーでオリジナルの RF 送信パルスシーケンスを開発する際、研究者はゴースト周波数を発生させる偽の周波数を発見しました。Figure 2A に示すように、RF パルス振幅の 40% の振幅を持つ予期しない励起信号が観察されました。研究者は、GE スキャナーの内部変調器を使用する代わりに、Pentek 社 Cobalt Model78621 PCI Express ボードを使用して RF パルスを生成することにより、この問題に対処しました。Model78621 によって作成された RF パルスは、Figure 2B に示すように、2 桁よりも低いスライス外励起を持ち、フルスケールスペクトル振幅の 0.1% を超えていません。



Model78621 2ch 800MHz D/A コンバーターを補間モードで使用して、2 ナノ秒のサンプリングレートで RF パルスを作成し、16 ビットの解像度で I および Q チャネルをスムーズに階段状に変調しました。中心周波数は、DAC5688 D/A コンバーターチップの数値制御発振器 (NCO) によって作成されました。信号は、カスタムパルスとそれに続く取得基準用の連続信号によって変調されます。変調 I および Q チャネルは、引数が連続的に増加する調和関数によって作成されます。テストでは、1019 ラジアンもの正弦波と余弦波の位相引数が依然として正確な波形を生成することが示されました。更新時間は 2 ナノ秒で、500 年以上有効です。

この前例のない精度を使用して、異なるスライスを励起するために使用される非共振周波数の位相を補正する基準信号を作成しました。Figure 3A の画像は、GE スキャナーによって作成された RF パルスを使用して従来どおりに取得されました。位相の一貫性の欠如は明らかです。Figure 3B の画像は、RF パルスが Model78621 D/A コンバーターによって合成されたことを除いて、同じシーケンスによって作成されました。Figure 3C では、比較のために標準の EPI 位相画像が示されています。スライス間の位相変動は Figure 3B で明らかであり、Figure 3C と一致しています。これは、Figure 3A を作成するために使用される標準的な取得の場合ではありません。



### 了承：

編集者は、ウィスコンシン医科大学生物物理研究所のアンドレ・ジェスマノビッチ准教授がこの記事を執筆し、説明する際に提供してくれた貴重な助けに感謝します。Jesmanowicz 博士は、多数の論文と2つの本の章を執筆または共著しています。彼は同僚とともに、多くの特許も持っています。彼が研究や論文を書いていないときは、グループスカイダイビングを楽しんでいます。

彼の研究は、Pentek 社 Model78621 Cobalt PCIe ボードのような最新の任意波形発生器を使用して、一貫した fcMRI 体積画像を作成できることを示しています。

**PENTEK**  
Now Part of Mercury

### Pentek 社について

Pentek 社は、ISO 9001 : 2015 認定企業として、デジタル信号処理・ソフトウェア無線・データ収集用の組込みコンピュータボードおよびレコーディングシステムを設計・製造しています。製品には、商用環境と耐環境の両方に対応した AMC、XMC、FMC、PMC、cPCI、PCIe、VPX のフォームファクタで準備されており、レーダ、無線通信、SIGINT、ビームフォーミング等の用途に幅広く利用されています。Pentek 社の詳細については、[www.pentek.com](http://www.pentek.com) をご参照ください。