

EPIの問題点と技術展望

吉留英二

理化学研究所脳科学総合研究センター認知脳科学研究グループ

はじめに

『EPIは100 ms以下の時間で画像が撮れる超高速撮像法の代表である』という過去の常識が、医療の現場ではそのまま通用しないことが判ってきた。ハードウェアはEPIに十分な性能を持つまでに改良され製品として広くゆきわたってきたのに、EPIの主流は依然としてマルチショットであり、従来のルーチン撮像法にとって代わるような勢いもない。EPIが活躍しているのは高速性が生かされるディフュージョン¹⁾、パフュージョン^{2),3)}とファンクショナルMRI⁴⁾の領域だけである。

本文では、なぜこのような事態に陥ったのか、そしてどうすればこの事態を解決できるのかについて技術者の立場から考える。

EPIの問題点

『100 msで撮像するためにシングルショットEPIを行うと画質が悪い。安全性も低くなる。そこでシングルショットはあきらめて1~2秒かけてマルチショットEPIで撮像し、画質を回復する。でもこうなると従来の高速撮像法と撮像効率は変わらなくなる。コントラストも特に良いわけではない。超高速性をなくしたEPIには一体何のメリットがあるのか?』というのがEPIを使った人の偽らざる感想では

なかろうか。EPIの問題点は画質と安全性と効率の3つに集約される。以下、各問題点について概説をする。

1) 画質

EPIの画像を見てまず感じるのはボケ(空間分解能の悪さ)、形状/濃度の歪、そしてゴーストの多さであろう。空間分解能の悪さはSN比の悪さをカバーするために生じている。これはエコーデータの収集時間が短いことと裏腹の関係にあり、超高速撮像では避けることができない。形状/濃度の歪は静磁場均一性の乱れ(空間微分)により生じる。第一の原因は人体の各部位における磁化率(サセプティビリティ)の相違である。同じ磁場をかけても発生する磁束密度は物質の磁化率により違う。たとえかけた静磁場が均一であってもそこに被検者が入ることで磁場(正確には磁束密度)は乱されてしまう。EPIはそのように小さい磁場の変化にも敏感に反応して歪をもたらし、渦電流も静磁場の乱れと同じような効果を示す。ただ、この場合には時間とともに乱れの大きさや場所が変わるだけにやっかいである。

ゴーストは、EPIが勾配磁場の極性を正/負反転しながらエコーデータを読み出すことに第一の原因がある。もちろん勾配磁場の極性の反転だけでゴーストが生じるわけではないが、従来の撮像法では影響が出ない程度のさまざまな現象に反応してしまう。

キーワード EPI, image quality, safety, efficiency

2) 安全性

勾配磁場の切り換えが高速で行われるため dB/dt が大きくなり、筋肉を痙攣させたり神経に電撃を与えたりするようになる。安全性に関しては各種ガイドライン⁵⁾で規制されているので今のところ問題はないと思われるが、電撃などの感じ方には個人差があるので注意が必要である。また、画質を改善するために勾配磁場の切り換え速度をあげると、人体への誘起電圧が高くなるので安全性が低下する。

dB/dt は勾配コイルに流れる電流の変化率とも比例するので、コイルがボビンをかして生じる打撃音も EPI は大きく、被検者には耳栓が不可欠である。音の周波数も従来より高く、刺激的である。

3) 効率

患者のスループットという面から考えるとまだ EPI の効果は発揮されていない。撮像を開始するまでに、患者のセッティング、ローカライズ、RF パルスのチューニング、さらに静磁場のシミングをすることが必要だが、これらの操作に時間がかかりすぎるため、たとえすべての撮像が EPI でできたとしても撮像時間全体の短縮効果は大きくない。また、EPI ではマルチスライス撮影をするとスライスの数だけ撮像時間が延びてしまう。従来の撮像法では多数のスライスを同時に撮像できるので、これと比べると全体としての撮像時間短縮効果はあまりない。これは EPI をマルチショット化した場合に特に顕著である。

問題点の解析

EPI は均一な静磁場と長い T_2^* を前提とした撮像法であり、撮像のための勾配磁場も理想的なものを期待している。しかし人体を撮像する場合には、前述のように被検体をマグネット

の中に入れてだけでも静磁場の均一性が乱される。特に磁化率の違う組織と空気の境での乱れは大きく、たとえ高次のシムを施しても均一性を回復することは難しい。静磁場の乱れ（空間微分）はそのまま画像上での形状/濃度歪となって現われる。また、EPI は勾配磁場の極性を交互に切り換えながらエコーデータを収集しているために、静磁場不均一による歪の出現方向がエコー毎に逆転し、ボケやゴーストの原因にもなる。

次に T_2^* の問題を考える。EPI では T_2^* 緩和で信号が減衰する前にすべてのデータを集める。しかし、集めたデータには T_2^* 緩和の重みがかかっているため、画像を再構成する際に勾配磁場の極性に合わせてエコーデータを時間反転すると、1 エコー毎にエコーデータの両端における信号強度が振動する。この振動が FOV の半分の距離だけずれた位置にゴーストを発生させる (Nyquist ゴースト)。

ゴーストの原因は T_2^* 緩和以外にもいろいろ判っており、たとえば渦電流の各軸による違い⁶⁾などの、従来の撮像法では問題にならなかったような特性にまで敏感に反応するので完全になくすのは難しい。

次に渦電流の問題を考える。シールドドグラジエントコイル (SGC) によってかなりの渦電流をなくすことができたが、EPI にはまだ不十分である。EPI はデータの読み出しを勾配磁場の高速切り換えで行っているため、渦電流の影響は従来の撮像法より大きい。定常状態に達した渦電流はちょうど静磁場に不均一を生じたのと同じ状態を呈するので、歪やゴーストの原因になる。渦電流でできた B_0 成分は画像に位置ずれをおこす。

先に述べたように、静磁場不均一や T_2^* 緩和はほとんど回避できない問題であり、これが EPI 特有の勾配磁場の極性切り換えと結び付

1997年10月23日受理

別刷請求先 〒351-01 埼玉県和光市広沢 2-1 理化学研究所脳科学研究センター認知脳科学研究グループ
吉留英二

くことで事態を悪化させている。勾配を反転しても同じエコーデータが取れるという前提は、人体を対象とする撮像にはあまりにも厳しすぎたのかもしれない。

解決策

効率の問題についてはEPIの問題点の項で述べたことから明らかなので、ここでは画質と安全性についての解決策を考える。

1) 画質

SN比を良くし、静磁場均一度をあげ、渦電流を減らすことが画質の改善につながる。そのもっとも簡単な解決策はEPIのマルチショット化である。マルチショットEPIは全体のデータ収集時間が増えるのでSN比が向上する。1ショットあたりのエコー収集時間を短くした分、静磁場不均一の影響（不均一*データ収集時間）が小さくなる。勾配磁場を高速に切り換える頻度が減少するので渦電流も減る。コントラスト上スピネコー法のプレパレーションを使うことができれば画像歪は更に少なくなる。Navigator echo¹⁾を使えばショット間の動きもある程度補正することができる。簡単だが強力な解決策である。だが、EPIから超高速性を取り去ったら後に何が残るのだろうか？この答えを見つけない限りマルチショットEPIは一時的なものではない。

SN比はRFコイルをフェイズドアレイなどに改良すること、勾配電源のスイッチング時間を短くすること、静磁場強度をあげることなどで向上する。これらの技術はすでに完成しているので、今後はこれら技術的に可能なことをコストパフォーマンスや安全性を考えながら取り入れ、改善していくことになる。

磁場不均一は、高次のシムまで短時間に、できれば自動的にそれぞれの被検者、部位ごとに行えればある程度の改善は望める。そして、本当に磁場均一度が上がれば読み出し勾配を小さくしてバンド幅を狭め、SN比を上げることも

できる。磁化率の変化によって生じる磁場不均一を *in vivo* でどこまで補正できるか、が残された問題である。

渦電流は頭部専用勾配コイル、SGC、非伝導性材料を用いたデュアーなどで改善することができる。と期待される。

ゴーストをなくすのは、勾配磁場の反転をやめない限り非常に難しい。T₂*緩和はどうすることもできないし、被検者が入った状態での静磁場均一度にも限界がある。データ収集時間を短くすればT₂*緩和や静磁場不均一により生じるゴーストは減るが、SN比の方がデータ収集時間の平方根に比例して悪くなる。コスト/パフォーマンスを考えて、EPIではゴーストが出るものと割り切ったほうが良いのではなからうか。どうしてもゴーストが邪魔なときには位相エンコード数を二倍にしてFOVの真ん中だけを切り出すことでNyquistゴーストをなくせる。ただし、マルチショットの場合にはNyquistゴーストが変調され、もっと近いところに現われるのでこの方法は使えない。

2) 安全性

勾配磁場の切り換え速度の高速化は画質を良くするために避けては通れない。しかし、勾配コイルを頭部専用コイルのように小さくすれば切り換え速度は速くなくてもdB/dtは抑えることができる。また、全身用の勾配コイルを使う場合にも、被検者は撮像中に手を組まない、読み出し勾配を垂直方向には設定しない、など運用上の注意をすることで安全性を高めることができる。

音に対してはコイルのボビンを固くしたり、アクティブノイズキャンセラを組み込むなどの対策が考えられる。

3) 他の撮像法

超高速撮像が目的であればEPIに固執せず他の撮像法にも目を向ける必要がある。スピネコーのコントラストで良ければfast SE⁷⁾やGRASE⁸⁾でかなり良い画像が得られるし、勾配磁場の切り換えがあまり速くない装置でも

スパイラルスキャン⁹⁾や Burst¹⁰⁾の可能性がある。もちろんそれぞれの撮像法にはそれぞれ固有の問題がある。Fast SE は SAR, GRASE やスパイラルスキャンはゴースト, Burst は SN 比に欠点がある。しかしすべてに完全な撮像法はないので、目的にあった撮像法を広い範囲から探し出し、最適化して使うようにし、がまんできる欠点には目をつぶることが必要である。そして多くの経験を積む中で『その撮像法にしかできないこと』を見つけ出すことが今後の発展には不可欠である。

おわりに

本文は第 25 回大会のシンポジウム発表をもとに EPI の現状をまとめ、今後の課題を整理した。EPI を使いこなすための技術の詳細については今年の MR 基礎講座, MR 先端講座に詳しく書いているのでそちらを参照していただくこととし、ここでは EPI の全体像を簡単に紹介した。本文が超高速撮像法についての議論を深める助けとなれば望外の喜びである。

文 献

1) Butts K, Pauly JM, de Crespigny A, et al. : Isotropic diffusion-weighted interleaved EPI with two orthogonal navigator echoes. Proc ISMRM 1996 : 188

2) Kim S-G : Quantification of relative cerebral blood flow change by flow-sensitive alternating inversion recovery (FAIR) technique : application to functional mapping. Magn Reson Med 1995 ; 34 : 293-301

3) Edelman RE, Siewert B, Darby DG, et al. : Qualitative mapping of cerebral blood flow and functional localization with echo-planar MR imaging and signal targeting with alternating radio frequency. Radiology 1994 ; 192 : 513-520

4) Kim S-G, Hu X, Adriany G, et al. : Fast interleaved echo-planar imaging with navigator : high resolution anatomic and functional images at 4 Tesla. Magn Reson Med 1996 ; 35 : 895-902

5) IEC International Standard 601-2-33 : Medical electronics equipment-Part 2 : Particular requirements for the safety of magnetic resonance equipment for medical diagnosis. First edition 1995-07

6) Zhou X, Epstein FH, Maier JK : Reduction of a nyquist ghost in oblique echo planar imaging. Proc ISMRM 1995 : 1477

7) Hennig J, Nauerth A, Friedburg H : RARE imaging : a fast imaging method for clinical MR. Magn Reson Med 1986 ; 3 : 823-833

8) Oshio K, Feinburg DA : GRASE (gradient and spin echo) imaging : a novel fast MRI technique. Magn Reson Med 1990 ; 20 : 344-349

9) Meyer CH, Hu BS, Nishimura DG, et al. : Fast spiral coronary artery imaging. Magn Reson Med 1992 ; 28 : 202-213

10) Hennig J : Fast imaging using burst excitation pulses. Proc SMRM 1988 : 238

Problems in EPI of Human Imaging : Do We Have Any Technology to Solve Them?

Eiji YOSHITOME

*Cognitive Brain Science Gr., Brain Science Institute, RIKEN
2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-01*

Recent development of hardware has allowed us to apply EPI to clinical diagnostics. Despite our early expectations, however, ultra-fast single-shot EPI is not in common use. Most EPI scans are conducted as multi-shot and their applications are limited to diffusion, perfusion and fMRI studies.

The principal cause of this situation relates to the poor image quality in single-shot EPI. Low spatial resolution, severe image distortion and ghost artifact are attributed to the short period of data acquisition, T_2^* decay, susceptibility oriented poor homogeneity of the magnetic field and eddy currents. Alternation of gradient pulse polarity, which is specific to EPI, further aggravates the situation. Multi-shot scanning is a simple yet powerful technique for improving image quality. Unfortunately, it lacks the greatest advantage of EPI, ultra-fast scanning. Phased array coils, shorter rise time of gradient power, head gradient coils, shielded gradient coils, higher order shim and non-conductive dewar are possible solutions for enhancing image quality in single-shot EPI.

Regarding safety, dB/dt is an issue in single-shot EPI. Rapid change of magnetic flux may cause nerve stimulation and loud acoustic noise. Head gradient coils are one good solution for improving image quality while keeping dB/dt at a low level.

Throughput is another concern that makes EPI less attractive. EPI is not very fast for multiple slices, even with the single-shot technique. The time consuming process of RF tuning, shimming and localization has a negative effect on the time reduction provided by EPI. In order to enhance ultra-fast EPI, it will be necessary to shorten the time required for these steps.

GRACE and Burst are possible alternatives to EPI. It is important for the future development of ultra-fast scanning to increase our experience with these techniques, and to identify the advantages these yet imperfect techniques offer.