

Multi-Band EPI を用いた Q-ball imaging tractography による 錐体路描出と新たな比較法の提案 [大会長賞記録]

鈴木雄一¹, 國松 聡², 三津田 実¹, 神谷 昂平²,
丸山 克也³, Yacoub Essa⁴, 渡辺 靖志¹, 更科 岳郎¹,
井野 賢司¹, 佐藤 次郎^{1,2}, 矢野 敬一¹, 大友 邦^{1,2}

¹東京大学医学部附属病院放射線部 ²同放射線科
³シーメンスジャパン株式会社 ⁴ミネソタ大学

目 的

近年、複数断面を同時励起する技術¹⁾とその精度を高める技術^{2),3)}を用いて、同時多断面励起および同時信号収集を行うことにより、撮像時間の短縮が可能な技術である multi-band EPI (MB-EPI) が開発され、報告がされ始めている。この技術は、アメリカの大規模治験である human connectome project の拡散強調画像 (diffusion weighted image; DWI) 撮像にも用いられている⁴⁾。

今回、我々はこの技術を Q-ball imaging (QBI)⁵⁾に用いて、錐体路 tractography を描出し、MB-EPI を用いない従来法と比較し、どのような特徴や傾向が生じるか検討した。また tractography の評価方法としてよく用いられる、dice similarity coefficients (DSC) で描出した tractography の類似度評価を行った。しかし DSC は、集合 X と Y の共通要素数を各集合の要素数の平均で割ったもので、集合の一致度を表すものであり、tractography の評価に必ずしも適しているとは言えない。そこで今回の研究では、DSC による評価に加え、静止画や動画の画質および構造類似度評価に用いられる structural similarity (SSIM)⁶⁾ index および map を用いて、従来法で描出した tractogra-

phy に対して MB-EPI を使用して描出した tractography がどの程度一致および類似しているのか検討するとともに、新しい tractography 評価方法としての SSIM index および map の可能性を検討した。

対象と方法

1. 対象

対象は、東京大学医学部倫理委員会の承認を得た方法で、書面による同意を得た右利き健康人男性ボランティア 12 名。平均年齢±標準偏差は、28.25±3.62 歳である。

2. 使用装置および撮像条件

使用装置は、SIEMENS 社製 1.5T MRI MAGNETOM Avanto B17 を用いた。またコイルは 12 チャンネルヘッドマトリックスコイルを使用した。

MB-EPI シーケンスは、ミネソタ大学で開発された Release Ro11a for VB17A⁷⁾ を使用し、以下の三つの撮像方法を用いて DWI データを取得した。方法 1 (従来法) は、MB-EPI を使用しない撮像方法、方法 2 (時間短縮法) は、方法 1 と同じ MPG 印加軸数だが MB-EPI を用いて撮像時間を短縮した撮像方法、そして方法 3 (MPG 増加法) は方法 2 で時間短縮した

キーワード diffusion weighted image, Q-ball imaging, multi-band EPI, tractography, structural similarity

分, MPG 印加軸数を増やし, 方法 1 とほぼ同じ撮像時間とした撮像方法である. 各撮像方法における共通条件は以下のとおりであり, 撮影断面は AC-PC line に平行に設定した. FOV = 274 × 274 (mm²), matrix = 98 × 98, スライス厚 = 2.8 (mm), スライス枚数 = 50, GRAPPA = 2, b-value = 3000 (s/mm²), b₀ (T₂WI) = 1 volume, 加算回数 = 1. また, 各方法における比較撮像条件は以下のとおりである. 方法 1: TR/TE = 7600/110 (ms/ms), MPG = 64 軸, MB factor (MBf) = 1, 撮像時間 = 518 秒. 方法 2: TR/TE = 4500/101 (ms/ms), MPG = 64 軸, MBf = 2, 撮像時間 = 327 秒. 方法 3: TR/TE = 4500/101 (ms/ms), MPG = 104 軸, MBf = 2, 撮像時間 = 507 秒. ここで MBf とは, 同時に励起するスライス断面数のことを示す.

3. 画像解析および tractography

得られた DWI に対して, FSL ver. 5.0.7 (<http://www.fmrib.ox.ac.uk/fsl/>) の eddt_correct を用いて, MPG に起因する歪みに対し補正処理を行った. その後, Diffusion toolkit ver. 0.6.2.2 (<http://www.trackvis.org/dtk/>) を使用して, QBI および DTI 解析を行った. また QBI tractography (QBT) 解析は TrackVis ver.0.6.0.1 (<http://www.trackvis.org>) を使用した. 描出する tractography は両側錐体路とし, 関心領域は左右大脳半球ごとに大脳脚と一次運動野とした. 大脳脚の関心領域設定は, DTI 解析で算出した fractional anisotropy (FA) 画像から, 大脳脚に手動で設定した. 一次運動野は, 広島市立大学増谷佳孝先生開発のフリーウェアである VOLUME-ONE ver.1.7.2 と dTV-II FZR を使用して, b₀ image から手動で設定した.

4. Tractography 評価

大脳脚を含むスライスより頭側のスライスを評価対象として, 方法 1~3 で得られた tractography に対して 2 値化処理を行った. 方法

1 に対し, 方法 2 および方法 3 で描出した錐体路 tractography の DSC を算出した. 算出式は以下のとおりである.

$$DSC = \frac{2 \times V(X \cap Y)}{V(X) + V(Y)}$$

ここで, X は方法 1 で描出した錐体路 tractography のボクセル, Y は方法 2 もしくは方法 3 で描出した錐体路 tractography のボクセル, V はボクセルの容積を表す.

続けて SSIM index を用いて評価を行った. SSIM index とは, 2 次元の画質評価に使用される指標で, 静止画や動画の評価においては MSE (mean squared error) や PSNR (Peak signal-to-noise ratio) よりも人間の主観的判断に近いと言われている指標である. SSIM index はピアソンの相関係数を用いており, 輝度項 $l(x, y)$, コントラスト項 $c(x, y)$ と構造的類似項 $s(x, y)$ からなり, x が原画像, y が復元画像であるとき

$$\begin{aligned} \text{SSIM index}(x, y) \\ = [l(x, y)]^\alpha [c(x, y)]^\beta [s(x, y)]^\gamma \end{aligned}$$

で表すことができ, $\alpha = \beta = \gamma = 1$ が好適とされている. 0 から 1 の範囲で算出される指標で, 1 に近いほど構造類似度が高い. これを MAL-TAB 2014b を用いて 3 次元に拡張し, DSC と同様の領域で大脳半球ごとの SSIM index を算出し, SSIM map を作成した.

結 果

結果画像例を Fig. 1 に示す. 全例, 全条件で錐体路 tractography は描出できた. しかし, 方法 1 に比べ, 方法 2 および方法 3 では描出容積が減少する傾向にあった. 方法 2 では MB-EPI を用いることで従来法よりも約 40 % の時間短縮が可能であった. DSC の平均値

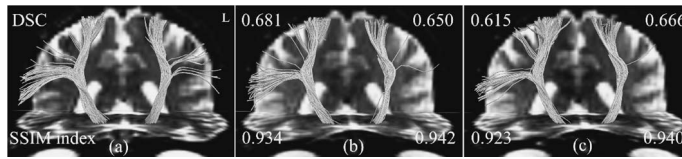


Fig. 1. DSC and SSIM index of example images
 (a) Method 1
 (b) Method 2
 (c) Method 3

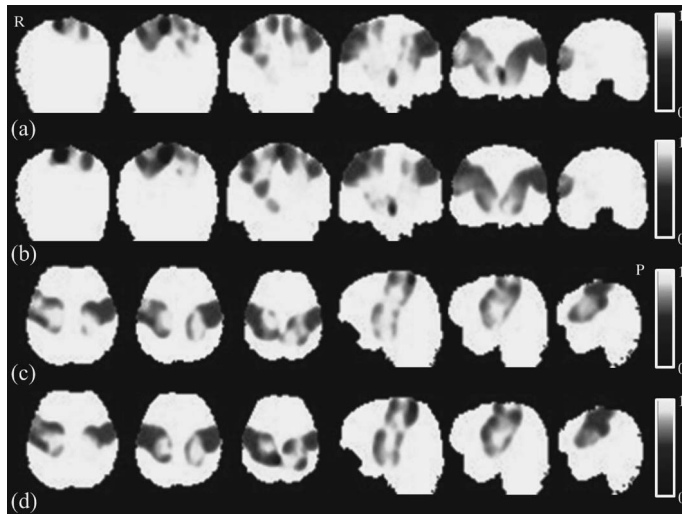


Fig. 2. SSIM map comparison
 (a) the coronal map of MB method 2
 (b) the coronal map of MB method 3
 (c) the axial and sagittal right hemisphere map of MB method 2
 (d) the axial and sagittal right hemisphere map of MB method 3
 The brighter area indicates better quality.

±標準誤差は、方法2では、右錐体路： 0.614 ± 0.0250 、左錐体路： 0.618 ± 0.0210 となり、方法3では、右錐体路： 0.609 ± 0.0206 、左錐体路： 0.647 ± 0.0233 となった。

また、SSIM indexの平均値±標準誤差は、方法2では、右錐体路： 0.936 ± 0.00332 、左錐体路： 0.942 ± 0.00269 となり、方法3では、右錐体路： 0.935 ± 0.00338 、左錐体路： 0.947 ± 0.00326 となった。続いて、SSIM mapをFig. 2に示す。構造類似度の度合いを視覚的に

認識することが容易であった。

考 察

DSCの結果、方法2を用いた右錐体路が0.614、左錐体路が0.618であり、方法3では、右錐体路が0.609、左錐体路が0.647であった。視放線におけるtractographyの再現性(追跡アルゴリズム; Spherical Harmonicsを使用したQBI)を検討したDayanらの報告⁸⁾

では、同一条件で2回連続撮像したデータ間の DSC は、約 0.75 であったと報告している。今回の実験系は、それとは条件が異なるが、彼らの DSC の評価基準 ($0.40 \leq DSC < 0.60$: fair, $0.6 \leq DSC < 0.75$: good, $0.75 \leq DSC$: excellent) を用いれば good と評価された。よって長時間撮像になりやすい QBI において、高速撮像が可能となる MB-EPI の有用性はあると思われるが、0.75 以上 (excellent) となった例は数例しかなかった。この原因は、MB-EPI 使用時に生じるスライス分離不全 (leakage factor)⁹⁾ によるものと考えられる。この影響により、局所の信号ムラが生じ、各ボクセルにおける神経線維分布の確率を表す方位分布関数 (orientation distribution function; odf) が従来法の odf と異なったため、odf を元に描出している QBT の走行が変化し、DSC が高値を示さなかったと考えられる。近年、leakage factor による信号ムラを改善する技術が開発され報告¹⁰⁾されたため、今後に期待したい。また、方法2に対して、方法3のように MPG 印加軸数を増加させても DSC の大幅な改善は見られなかった。これは、正多面体の頂点への MPG で考えた場合、81 軸 (320 面体の半球分) で頂点間角度は約 16 度、181 軸 (720 面体の半球分) で約 10 度であるため、今回程度の MPG 印加軸数増加では、QBT の結果に大きく反映されなかったのではないかと推測した。今回の条件では、MB-EPI 使用に伴う leakage factor の影響による画質劣化の方が、MPG による角度分解能向上を上回ったと考えられる。よって、MB-EPI を使用する場合、MPG による角度分解能向上よりも撮像時間短縮を目的とした方が、より MB-EPI のメリットを活かすことができると考えられた。

MRI における SSIM index は、compressed sensing¹¹⁾、心筋拡散テンソル解析の画像処理の違い¹²⁾や磁化率低減技術における撮像方法の違い¹³⁾が結果画像にどの程度影響するかなどを調べるのに使用され報告されている。しか

し、いずれの報告も 2 次元画像としての利用であった。今回我々は、3 次元データである tractography に対して SSIM index を用い、DSC と同様の評価傾向を得ることができた。DSC と SSIM index との相関係数は 0.640 であり、正の相関があることも示された。したがって、DSC 同様に、SSIM index を用いて tractography の描出能比較および評価ができる可能性が示唆された。DSC は、重複した集合容積を数値でのみ評価するものである。一方、SSIM は index における数値的な評価が可能なことに加えて、map を用いることで、視覚的に (3 次的に) 構造類似度を確認しやすい利点があると考えられる。SSIM index は、人間の主観的な判断に近い値を算出する⁶⁾と言われているため、tractography の視覚評価に変わる方法としても可能性が示唆される。しかし、今回算出に使用した各係数をそのまま用いて良いかや、計算対象領域をどう設定すべきかなどの検討は今後必要である。

結 論

DSC による評価では、方法2と方法3で大きな差はなかった。このことから、MB-EPI を使用する場合、MPG の角度分解能向上よりも時間短縮の方がより MB-EPI の有用性を活用できると言える。SSIM index も DSC と同様の傾向を示し、両者間で正の相関が認められた。Tractography の比較評価法において、SSIM index および map を用いた方法の可能性が示唆された。

謝 辞

本研究は、JSPS 科研費 26460721 の助成を受けたものです。本研究にご指導いただいた実験動物中央研究所 小牧裕司氏に感謝申し上げます。

文 献

- 1) Moeller S, Yacoub E, Olman CA, et al. : Multi-band multislice GE-EPI at 7 tesla, with 16-fold acceleration using partial parallel imaging with application to high spatial and temporal whole-brain fMRI. *Magn Reson Med* 2010 ; 63 : 1144–1153
- 2) Setsompop K, Gagoski BA, Polimeni JR, et al. : Blipped-controlled aliasing in parallel imaging for simultaneous multislice echo planar imaging with reduced g-factor penalty. *Magn Reson Med* 2012 ; 67 : 1210–1224
- 3) Setsompop K, Cohen-Adad J, Gagoski BA, et al. : Improving diffusion MRI using simultaneous multi-slice echo planar imaging. *Neuroimage* 2012 ; 63 : 569–580
- 4) <http://www.neuroscienceblueprint.nih.gov/connectome/>
- 5) Tuch DS : Q-ball imaging. *Magn Reson Med* 2004 ; 52 : 1358–1372
- 6) Wang Z, Bovik AC, Sheikh HR, Simoncelli EP : Image quality assessment : from error visibility to structural similarity. *IEEE Trans Image Process* 2004 ; 13 : 600–612
- 7) <https://www.cmrr.umn.edu/multiband/>
- 8) Dayan M, Kreutzer S, Clark CA : Tractography of the optic radiation : a repeatability and reproducibility study. *NMR Biomed* 2015 ; 28 : 423–431
- 9) Xu J, Moeller S, Auerbach EJ, et al. : Evaluation of slice accelerations using multiband echo planar imaging at 3 T. *Neuroimage* 2013 ; 83 : 991–1001
- 10) Calley SF, Polimeni JR, Bhat H, et al. : Interslice leakage artifact reduction technique for simultaneous multislice acquisitions *Magn Reson Med* 2014 ; 72 : 93–102
- 11) Zhu Z, Wahid K, Babyn P, Yang R : Compressed sensing-based MRI reconstruction using complex double-density dual-tree DWT. *Int J Biomed Imaging* 2013 ; 2013 : 907501
- 12) Bao L, Robini M, Liu W, Zhu Y : Structure-adaptive sparse denoising for diffusion-tensor MRI. *Med Image Anal* 2013 ; 17 : 442–457
- 13) Sveinsson B, Worters PW, Gold GE, Hargreaves BA : Hexagonal undersampling for faster MRI near metallic implants. *Magn Reson Med* 2015 ; 73 : 662–668

Visualization of Corticospinal Tract by Q-ball Imaging Tractography using Multi-Band EPI and New Method of Comparison [Presidential Award Proceedings]

Yuichi SUZUKI¹, Akira KUNIMATSU², Minoru MITSUDA¹,
Kouhei KAMIYA², Katsuya MARUYAMA³, Yacoub ESSA⁴,
Yasushi WATANABE¹, Takeo SARASHINA¹, Kenji INO¹,
Jiro SATO^{1,2}, Keiichi YANO¹, Kuni OHTOMO^{1,2}

¹*The division of Radiology, The University of Tokyo Hospital
Hongo 7-3-1, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8655*

²*The department of Radiology, The University of Tokyo Hospital*

³*Siemens K.K.*

⁴*University of Minnesota*

Purpose: We aimed to depict the pyramidal tract using Q-ball imaging (QBI) with multi-band (MB) EPI and to evaluate the depiction ability of tractography using the dice similarity coefficients (DSC), structural similarity (SSIM) index, and map which are usually used for image evaluation.

Materials and Methods: We studied 12 men (age, 28.25 ± 3.62 years). Diffusion MRI data were acquired with SIEMENS MAGNETOM Avanto 1.5T B17. The following three methods were compared. Method 1 (conventional method [no MB]): MPG = 64, and acquisition time = 518 s. Method 2 (MB method [shortened scanning time]): MPG = 64, MB factor (MBf) = 2, and acquisition time = 327 s. Method 3 (MB method [an increased number of MPG directions]): MPG = 104, MBf = 2, and acquisition time = 507 s. QBI analysis and tractography were performed, and the pyramidal tracts were depicted. The DSC of the depicted pyramidal tract volumes obtained from the MB methods were compared with those obtained from the conventional method. Similarly, the three-dimensional SSIM index and map were calculated. The coefficient of correlation between DSC and SSIM index was calculated.

Results: The DSC of the right and left pyramidal tract obtained from methods 2 and 3 were 0.614, 0.618 and 0.609, 0.647 of the DSC obtained from method 1, respectively. Moreover, the SSIM indices for the right and left pyramidal tracts obtained from methods 2 and 3 were 0.936, 0.942 and 0.935, 0.947, respectively. A similarity ratio was easily recognized visually with SSIM map. The coefficient of correlation between DSC and SSIM indices was 0.640.

Conclusion: Method 2 has an advantage over method 3 in QBI tractography. The SSIM index showed a trend similar to the DSC, and equilateral correlation was demonstrated between the DSC and SSIM indices. The SSIM index and map suggested the possibility of a new method of tractographic evaluation.