

三次元 B₁ 分布の高速計測手法 [大会長賞記録]

横 沢 俊, 金子幸生, 大竹陽介, 谷口 陽,
五月女悦久, 尾藤良孝

株式会社日立製作所中央研究所

はじめに

RF 照射強度 (B₁) の分布は, RF シミングの制御や導電率イメージング, 局所 SAR の推定計算など様々なアプリケーションに応用されており, 診断画像同様に 3 次元計測の必要性が高まっている^{1)~3)}. これまで, 3 次元の B₁ 分布を高速に計測する手法として, Bloch-Siegert シフトを利用した手法が提案されており, 3T 装置において 32 秒で 3 次元の B₁ 計測を可能としている⁴⁾.

本報告では, より簡便で高速な計測をめざし, プリパルスのフリップ角 (FA : flip angle) 変調を用いた B₁ 分布の 3 次元計測手法を提案する.

方 法

3 次元 B₁ 分布の計測シーケンス図を Fig. 1 に示す. 本研究では, プリパルスを付加した 3D FLASH (fast low angle shot) を繰り返し実行し, プリパルスなし (set 1), プリパルスの FA = α (set 2), プリパルスの FA = 2α (set 3) の 3 セットの 3 次元画像を取得した. 各セットの信号強度を S₁, S₂, S₃ とすると, B₁ は α との比として次式で算出できる.

$$B_1 = \frac{1}{\alpha} \arccos \left(\frac{|S_1 - S_3|}{|2(S_1 - S_2)|} - 1 \right) \quad \left(0 \leq B_1 \leq \frac{\pi}{\alpha} \right) \dots \dots (1)$$

本手法は, set 2 および set 3 のデータ取得時において縦磁化の回復が不完全であると計算

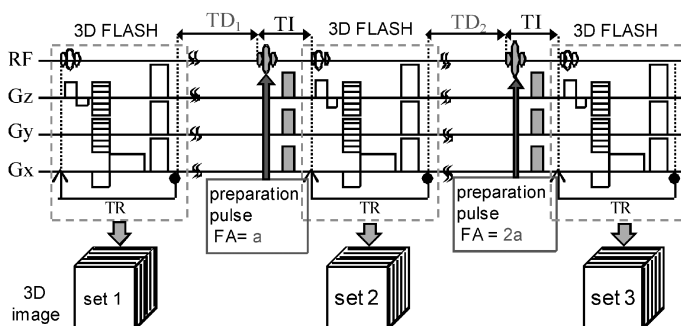


Fig. 1. The proposed sequence

キーワード B₁ mapping, 3D, fast, preparation pulse, FLASH

に誤差を生じる．そこで， T_1 緩和の影響を抑制したまま計測時間を短縮するため，スピン緩和シミュレーションを用いて，計算誤差10%以内で計測時間が最小となるようにプリパルスのFA α および 3D FLASH の時間間隔 TD_1 , TD_2 を最適化した．スピン緩和シミュレーションでは，任意の B_1 および T_1 において，Fig. 1 のシーケンスタイムチャートに基づき，時間 t における縦磁化 $M_z(t)$ を計算し，緩和の影響を含む画像信号強度を見積もった．ここでは，RF 照射直後の縦磁化および横磁化は，RF 照射中の緩和を考慮せず，回転角をFA とする回転行列にて算出した．また，計算した画像信号強度を式(1)に代入し B_1 値 ($B_{1,cal}$) を求め，計算条件の B_1 値 ($B_{1,con}$) との誤差 Err を算出した．シミュレーションに使用した計算条件は以下のとおりである． $0.3 \leq B_1 \leq 1.5$, $100 \leq T_1 \leq 1500$, TR/TE 4.0/1.53 ms, $M_z(0)$ 1.0, TI 5.0 ms, FA (FLASH) 1.0, RF duration (FLASH) 0.3 ms, RF duration (プリパルス) 3.0 ms.

本手法の有用性を確認するため実機実験を行った．3T MRI (Agilent 社製：旧 Varian) において本手法と double angle method (DAM)⁵⁾ でトルソファントム (塩化ニッケル水溶液，寸法 $320 \times 220 \times 320$ mm) の三次元 B_1 分布を計測し，正規化相互相関係数 (NCC: normalized cross correlation) および差分の平均値で各スライスの B_1 分布の類似性を評価した．本手法の撮像条件は以下のとおりである．FOV $350 \times 350 \times 352$ mm, TR/TE 4.0/1.53 ms, FA (FLASH) 1.0, duration (FLASH) 0.3, matrix $64 \times 32 \times 32$, TI 5.0 ms, duration (プリパルス) 3.0 ms. また，DAM の撮像条件は以下のとおりである．シーケンス 2D gradient echo, FOV 350 mm, TR/TE 5000/5.0 ms, thickness 11 mm, interval 11 ms, FA 60, 120, スライス枚数 32, matrix 64×32 .

結 果

プリパルスのFA (α) が計算誤差に与える影響を Fig. 2 に示す．ここでは， $TD_1 = 5$ s, $TD_2 = 5$ s のとき， $0.3 \leq B_1 \leq 1.5$, $100 \leq T_1 \leq 1500$ の範囲において最大の計算誤差値をプロットした．Fig. 2 より α が大きいほど計算誤差が小さくなることがわかる． B_1 のダイナミックレンジを $B_1 \leq 1.5$ とすると，式(1)より $\alpha \leq 120$ であり，計算誤差が最小となる最適な α は 120 となる．また，時間間隔 TD_1 , TD_2 と計算誤差の関係を Fig. 3 に示す．ここでは， $\alpha = 120$ とし，Fig. 1 と同様に $B_1 \leq 1.5$, $100 \leq T_1 \leq 1500$ の範囲において計算誤差の最大値をプロットした．Fig. 3 より TD_1 , TD_2 が長いほど誤差が小さくなることがわかる．最大の計算誤差が10%以内で計測時間が最短となる TD_1 , TD_2 の組合せは， $TD_1 = 3.3$ s, $TD_2 = 0.7$ s であった．

本手法と DAM の実機実験の比較結果を Fig. 4 に示す．図中の (a) は本手法および DAM で計測した三次元 B_1 分布，(b) はスライス間の NCC，(c) はスライス間の差分の平均値を示す．Fig. 4 (a), (b) より，本手法と DAM

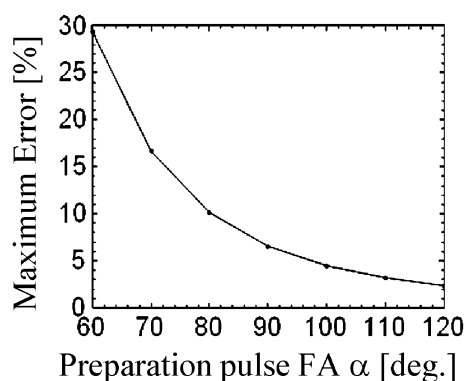


Fig. 2. The preparation pulses (FA α) and calculation error

とで B₁ 分布が類似していることがわかる。一方, Fig. 4(c)より本手法の B₁ 分布が DAM の分布に対してオフセットをもつことがわかる。DAM 法の撮像時間は 160 秒であるのに対し, 本手法の撮像時間は 18.3 秒であった。

考 察

3D FLASH の計測間隔 TD₁, TD₂ について, TD₂ と比べて TD₁ の計算誤差への影響が大きかった。これは, TD₂ 後に取得する set 3 のプリパルスの FA は set 2 のプリパルスの 2 倍であるため, 相対的な FA の誤差が小さくなることと, set 2 の画像の信号強度が B₁ 算出において分母の項の誤差に影響するためであると考えられる。本手法で計測した B₁ 分布は DAM の分布に対してオフセットがあった。これは, 90 度パルスの調整不足や DAM の 2D マルチスライス計測と本手法の 3D 計測とで RF 励起プロファイルに差異があるためであると考えられる。

本研究では, シミュレーションによる最適化の条件として $0.3 \leq B_1 \leq 1.5$, $100 \leq T_1 \leq 1500$ を使用したが, 対象組織の B₁ と T₁ の範囲が変われば, 最適値も変化すると考えられる。特に, T₁ の影響は大きく, 腹水部や脊髄など T₁ のよ

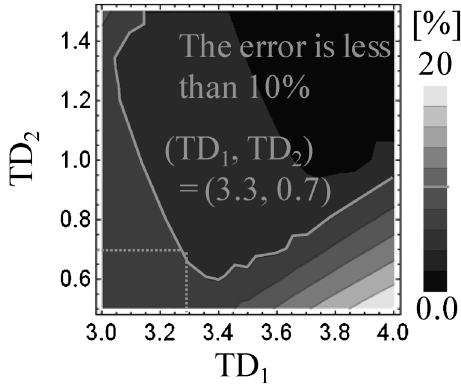


Fig. 3. The time interval (TD₁, TD₂) and calculation error

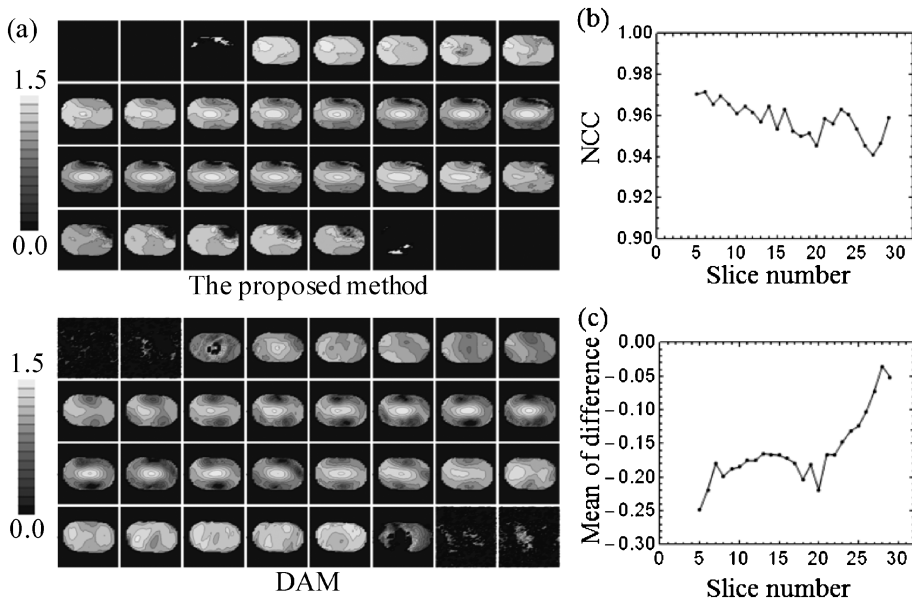


Fig. 4. The comparison results. (a) B₁ map (upper : the proposed method. lower : DAM), (b) NCC, (c) Mean of difference.

り長い組織 ($T_1 \geq 1500$) を対象とした最適化では、時間間隔 TD_1 , TD_2 の最適値はそれぞれより長い値になると考えられる。本手法では、自由に対象組織のパラメータを設定できるため、対象組織に応じた計測パラメータの最適化が可能である。

本研究では、3T 装置において提案手法が従来手法の 32 秒より短時間 (18.3 秒) で DAM とほぼ同等の三次元 B_1 分布が取得可能であることを示した。

結 論

本研究では、簡便な手法により、高速に 3 次元の B_1 分布を計測可能な手法を提案し、シミュレーションにより計算誤差が最少となる計測パラメータを抽出した。実機でのファントム計測において、3 次元 ($64 \times 32 \times 32$) の B_1 分布を 18.3 秒で取得可能であることを示した。

文 献

- 1) Hajnal JV, Malik SJ, Larkman DJ, O'Regan D, Nehrke K, Katscher U, Graesslin I, Börner P. Initial experience with RF shimming at 3T whole body 8 channel RF system. Proc Intl Soc Mag Reson Med 2008 ; 16 : 496
- 2) Cloos MA, Bonmassar G. Towards direct B_1 based local SAR estimation. Proc Intl Soc Mag Reson Med 2009 ; 17 : 3037
- 3) Katscher U, Voigt T, Findekklee P, Vernickel P, Nehrke K, Dossel O : Determination of electrical conductivity and local SAR via B_1 mapping. IEEE Trans Med Imaging 2009 ; 28 : 1365-1374
- 4) Saranathan M, Khalighi MM, Kerr AB, Rutt BK. Fast 3D B_1+ Mapping using An Optimized, Asymmetric Bloch-Siegert Method. Proc Intl Soc Mag Reson Med 2009 ; 17 : 3037
- 5) Insko EK, Bolinger L : Mapping of the radiofrequency field. J Magn Reson A 1993 ; 103 : 82-85

Fast 3D B_1 Mapping [President Award Proceedings]

Suguru YOKOSAWA, Yukio KANEKO, Yosuke OTAKE,
Yo TANIGUCHI, Yoshihisa SOUTOME, Yoshitaka BITO

*Central Research Laboratory, Hitachi, Ltd.
1-280 Higashi-koigakubo, Kokubunji-shi, Tokyo 185-8601*

We propose a fast 3-dimensional (3D) B_1 mapping method using 3D FLASH (fast low angle shot) with preparation pulses. We optimized scan parameters using a simulation of spin relaxation to achieve the shortest acquisition time while maintaining the accuracy of the B_1 map and then applied the method to phantom imaging using a 3-tesla scanner and compared the results with those using DAM (double angle method) to evaluate accuracy. Although there was a slight offset in the B_1 value, the distribution of the B_1 map was similar between the proposed method and DAM. Acquisition time was 18.3 s for the proposed method and 160 s for DAM. We demonstrated that the proposed method provides fast 3D B_1 mapping with equivalent accuracy to that of DAM.