

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6091948号

(P6091948)

(45) 発行日 平成29年3月8日(2017.3.8)

(24) 登録日 平成29年2月17日(2017.2.17)

(51) Int.Cl. F I  
**A 6 1 B 5/055 (2006.01)** A 6 1 B 5/05 3 1 1

請求項の数 15 (全 27 頁)

(21) 出願番号	特願2013-55231 (P2013-55231)	(73) 特許権者	390039413
(22) 出願日	平成25年3月18日 (2013.3.18)		シーメンス アクチエンゲゼルシャフト
(65) 公開番号	特開2013-192941 (P2013-192941A)		Siemens Aktiengesellschaft
(43) 公開日	平成25年9月30日 (2013.9.30)		ドイツ連邦共和国 D-80333 ミュンヘン ヴィッテルスバッハープラッツ 2
審査請求日	平成28年2月1日 (2016.2.1)		Wittelsbacherplatz 2, D-80333 Muenchen, Germany
(31) 優先権主張番号	10 2012 204 401.9	(74) 代理人	100075166
(32) 優先日	平成24年3月20日 (2012.3.20)		弁理士 山口 巖
(33) 優先権主張国	ドイツ(DE)	(74) 代理人	100133167
(31) 優先権主張番号	10 2012 212 402.0		弁理士 山本 浩
(32) 優先日	平成24年7月16日 (2012.7.16)		
(33) 優先権主張国	ドイツ(DE)		

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 磁気共鳴システムの制御シーケンスの決定方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

磁気共鳴システム(1)から放出される少なくとも1つの高周波パルス列(MP)を含む磁気共鳴システムの制御シーケンス(AS)を決定する方法において、

目標磁化(m)を検出するステップと、

前記目標磁化(m)に基づいてk空間内のエネルギー分布関数( $E(k)$ ,  $E(k_r)$ ,  $E'(k_r)$ )を決定するステップと、

k空間内のエネルギー分布関数( $E(k)$ ,  $E(k_r)$ ,  $E'(k_r)$ )を考慮してk空間軌道( $k(t)$ )を決定するステップと、

H Fパルス最適化法で前記k空間軌道( $k(t)$ )について前記高周波パルス列(MP)を決定するステップと

を含んでいる磁気共鳴システムの制御シーケンス決定方法。

【請求項 2】

k空間内のエネルギー分布関数( $E(k)$ ,  $E(k_r)$ ,  $E'(k_r)$ )を決定するために前記目標磁化(m)のフーリエ変換が実行されることを特徴とする、請求項1に記載の方法。

【請求項 3】

k空間内のエネルギー分布関数( $E(k)$ ,  $E(k_r)$ ,  $E'(k_r)$ )を決定するために前記目標磁化(m)が平均値減算されることを特徴とする、請求項1または2に記載の方法。

## 【請求項 4】

k 空間内のエネルギー分布関数 ( $E(k)$ ,  $E(k_r)$ ) が変更され、前記 k 空間軌道 ( $k(t)$ ) の決定は、変更された k 空間内のエネルギー分布関数 ( $E(k)$ ,  $E'(k_r)$ ) を考慮して行われることを特徴とする、請求項 1 から 3 のいずれか 1 項に記載の方法。

## 【請求項 5】

k 空間内のエネルギー分布関数 ( $E'(k_r)$ ) が各空間区域 (a) にセグメント化され、個々の空間区域 (a) 内でそれぞれ異なるように変更されることを特徴とする、請求項 4 に記載の方法。

## 【請求項 6】

前記セグメント化はエネルギー分布関数 ( $E'(k_r)$ ) の極値 ( $E_m$ ) に基づいて行われることを特徴とする、請求項 5 に記載の方法。

## 【請求項 7】

k 空間内のエネルギー分布関数 ( $E(k_r)$ ) が重み関数 (W) でスケーリングされることを特徴とする、請求項 4 から 6 のいずれか 1 項に記載の方法。

## 【請求項 8】

k 空間内のエネルギー分布関数 ( $E(k_r)$ ) が個々の空間区域 (a) 内でそれぞれ該当する空間区域 (a) に割り当てられた重み関数 (W) の値でスケーリングされることを特徴とする、請求項 5 または 6 を引用する請求項 7 に記載の方法。

## 【請求項 9】

k 空間内のエネルギー分布関数 ( $E(k)$ ) の次元が縮小されることを特徴とする、請求項 1 から 8 のいずれか 1 項に記載の方法。

## 【請求項 10】

複数の  $B_1$  マップが検出され、エネルギー分布関数 ( $E(k)$ ,  $E(k_r)$ ,  $E'(k_r)$ ) の決定は前記  $B_1$  マップに関係して行われること、  
 $B_0$  マップ ( $B_0$ ) が検出され、エネルギー分布関数 ( $E(k)$ ,  $E(k_r)$ ,  $E'(k_r)$ ) の決定は前記  $B_0$  マップ ( $B_0$ ) に関係して行われること、  
 および、前記 k 空間軌道 ( $k(t)$ ) の決定は予め定められた k 空間軌道タイプ ( $kTT$ ) を考慮して行われること

の少なくとも 1 つを含むことを特徴とする、請求項 1 から 9 のいずれか 1 項に記載の方法

## 【請求項 11】

現在の  $B_0$  マップ ( $B_0$ ) および目標磁化 (m) の少なくとも一方に基づく解析関数によって k 空間内のエラー密度 ( $B_{0,err}(k)$ ) が算出され、前記 k 空間軌道 ( $k(t)$ ) の決定は前記エラー密度 ( $B_{0,err}(k)$ ) を考慮して行われることを特徴とする、請求項 1 から 10 のいずれか 1 項に記載の方法。

## 【請求項 12】

まず請求項 1 から 11 のいずれか 1 項に記載の方法で制御シーケンス (AS) が決定され、次に前記制御シーケンス (AS) を利用して前記磁気共鳴システム (1) が作動される磁気共鳴システムの作動方法。

## 【請求項 13】

磁気共鳴システム (1) から放出される少なくとも 1 つの高周波パルス列 (MP) を含む磁気共鳴システムの制御シーケンス (AS) を決定する制御シーケンス決定装置 (22) において、

目標磁化 (m) を検出するための入力インターフェース装置 (23) と、

前記目標磁化 (m) に基づいて k 空間内のエネルギー分布関数 ( $E(k)$ ,  $E(k_r)$ ,  $E'(k_r)$ ) を決定するエネルギー分布決定ユニット (24) と、

k 空間内のエネルギー分布関数 ( $E(k)$ ,  $E(k_r)$ ,  $E'(k_r)$ ) を考慮して k 空間軌道 ( $k(t)$ ) を決定する軌道決定ユニット (25) と、

前記 k 空間軌道 ( $k(t)$ ) について前記高周波パルス列 (MP) を決定する HF パル

10

20

30

40

50

ス最適化ユニット(26)と  
を備える制御シーケンス決定装置。

【請求項14】

高周波送信装置(6)と、  
グラジエントシステム(4)と、  
所望の測定を実施するために、予め定められた制御シーケンス(AS)に基づいて高周波パルス列を放出するとともに、この高周波パルス列と協調してグラジエントシステムを介してグラジエントパルス列(GP)を放出する制御装置(15)と  
を備える磁気共鳴システム(1)において、

制御シーケンスを決定してこれを前記制御装置(15)へ送るために、請求項13に記載の制御シーケンス決定装置(22)を有していることを特徴とする磁気共鳴システム。

10

【請求項15】

制御シーケンス決定装置(22)の記憶装置へ直接にロード可能であり、前記プログラムが前記制御シーケンス決定装置(22)内で実行されるときに、請求項1から11のいずれか1項に記載の方法のすべてのステップを実施するためのプログラムコードセグメントを有しているコンピュータプログラム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

20

本発明は、磁気共鳴システムの制御シーケンスの決定方法および制御シーケンス決定装置に関する。さらに本発明は、このような磁気共鳴システムの制御シーケンスを利用した磁気共鳴システムの作動方法に関する。さらにまた、本発明は、高周波送信装置と、グラジエントシステムと、所望の測定を実施するために予め定められた制御シーケンスに基づいて高周波パルス列を放出しかつこの高周波パルス列と協調してグラジエントシステムを通じてグラジエントパルス列を放出するように構成された制御装置とを備える磁気共鳴システムに関する。

【背景技術】

【0002】

磁気共鳴断層撮影システム(略して「磁気共鳴システム」)では、通常、検査されるべき物体が、基本磁気システムにより、たとえば3かまたは7テスラの比較的高い基本磁場(いわゆる $B_0$ 磁場)に暴露される。これに加えてグラジエントシステムにより、磁場グラジエントが印加される。そして高周波送信システムを通じて、適当なアンテナ装置により高周波の励起信号(HF信号)が放出され、このことは、この高周波磁場により共鳴励起される特定の原子または分子の核スピンの、基本磁場の磁束線に対して、定義されたフリップ角だけ傾くという帰結をもたらすためである。以下において、このような高周波励起ないしその結果生じるフリップ角分布は、核磁化あるいは略して「磁化」と呼ばれる。核スピンの緩和されるときに高周波信号、いわゆる磁気共鳴信号が放射され、これが適当な受信アンテナにより受信されてから、さらに処理される。最後に、こうして取得された生データから、所望の画像データが再構成される。核スピン磁化のための高周波信号の放出(いわゆる $B_1$ 磁場)は、多くの場合、測定室(患者トンネル)の周囲で機器に固定的に配置されたいわゆる「全身コイル」によって行われる。磁気共鳴信号の受信は、多くの場合、患者の身体にさらに密着して位置決めされるいわゆる局所コイルによって行われる。あるいは原則としては、全身コイルによって磁気共鳴信号の受信を行うこともでき、および/または局所コイルによってHF信号の放出を行うこともできる。

30

40

【0003】

特定の測定のためには、放出されるべき高周波パルス列と、これに対応して切り換えられるべきグラジエントパルス列(スライス選択方向、位相エンコーディング方向、および読み取り方向の適当なグラジエントパルスを含む)、ならびにその他の制御設定を含む制御シーケンスが、いわゆる測定プロトコルで定められる。このような測定プロトコルは事

50

前に作成しておいて、特定の測定のためにたとえば記憶装置から呼び出し、場合により操作者によってその場で変更することができる。そして測定中には、磁気共鳴システムの制御がこの制御シーケンスに基づいて完全自動式に行われ、磁気共鳴システムの制御装置は測定プロトコルからコマンドを読み出してこれを処理する。

#### 【0004】

制御シーケンスを作成するために、多くの場合、個々のHFパルス列すなわちHF軌道が個々の送信チャネルについて、通常は測定プロトコルまたは操作者により個別的に設定される固定的な「k空間軌道」に関して、時間に対して最適化方法で決定される。このような「送信k空間軌道」（以下においては略して単に「k空間軌道」または「軌道」と呼ぶ）は、個々のグラジエントの調整によって、特定の時間で通過されるk空間内の位置である。k空間は空間周波数空間であり、k空間内の軌道は、HFパルスが放出されたとき、グラジエントパルスの相応の切換によって、時間的にどのような経路でk空間が通過されるかを表している。このようにk空間軌道を設定することによって、特定のHFエネルギー量がどの空間周波数で蓄積されるかを特定することができる。

#### 【0005】

このとき制御シーケンスを作成するために、追加的に、特定のアンテナ部材について空間的な $B_1$ 磁場分布をそれぞれ表す現在測定されている複数の $B_1$ マップ（「 $B_1$  - Maps」）と、オフ共鳴ないし本来所望の均一な $B_0$ 磁場からの $B_0$ 磁場の逸脱を空間的に解像して表す $B_0$ マップ（「 $B_0$  - Map」）とを、最適化方法で考慮に入れることができる。さらに利用者は、HFパルス列の計画作成のために、たとえば所望のフリップ角分布のような目標磁化をしばしば設定する。そして、適当なHFパルス最適化プログラムによって適切なHFパルス列が実現され、その結果として目標磁化が実現される。これは多くのケースにおいて、所望の検査されるべき撮像視野（Fov, Field of View）ないし所望の励起されるべき領域（FoE, Field of Excitation）におけるできる限り均一な磁化である。

#### 【0006】

近年の新しい方法では、きわめて特定された領域を選択的に、たとえば二次元で、スライス内部で励起することも可能であり、すなわち、意図的に均一でない目標磁化が求められる。

#### 【0007】

二次元の高周波パルスシーケンス（いわゆる「2DRFパルス」）を上にも説明した仕方で決定するという可能性は、特許文献1に記載されている。このとき横方向の目標磁化は、空間的なコイルプロフィルとマルチチャネル高周波パルス列とで構成される線形マトリクス連立方程式で表され、このマトリクス連立方程式には、存在している $B_0$ マップや $B_1$ マップ、適用されるk空間軌道等に関する情報も取り入れることができる。

#### 【0008】

そして、適切な高周波パルス列を得るために、この連立方程式を特定の予め定められた目標磁化について数値的に解くことができる。選択的に励起されるこのような種類の高周波パルス列の例は、エコープラナー軌道や螺旋軌道である。

#### 【0009】

しかしながら、単純なスライス選択的励起のために適用される、一定のグラジエントをもつ通常適用される軌道と比較したとき、このような選択的励起のための一次元、二次元、または多次元のk空間軌道は著しく高い複雑性を有している。こうした高い複雑性に基づき、たとえばそのようなパルスが著しく長くなり得るという理由だけで、画像でのアーチファクト形成の高いリスクも存在する。さらに、ハードウェア高周波制限および/または患者の高周波負荷に関わる制限を超過するといういっそう高いリスクも存在する（たとえば $SAR = Specific\ Absorption\ Ratio$ 比吸収率や $SED =$ 比エネルギー密度の制限）。このことは特に、今日多くの場合に適用されている、隣接する軌跡の等距離の推移を有する軌道について当てはまり、たとえば周回線が一定のリードで推移する螺旋軌道や、等しい間隔で平行に延びる直線状の隣接軌跡をもつ直線軌道につ

10

20

30

40

50

いて当てはまる。

#### 【 0 0 1 0 】

しかしながら、最大限許容される電圧ピークまたは高周波電力制限を超過することは機器ハードウェアの損傷につながり、あるいは、のちの測定時に高周波パルスが安全性検査に基づいて制限され、特に電力に関して切り詰められることにつながり、このことは、ひいては満足 of いかない励起結果につながるとともに、その帰結として画像データの劣化につながる。こうした理由から、最近では複雑な  $k$  空間軌道は最適化方法の枠内で自動的に算出され、さらにこの最適化方法では、最大限許容される電力、SAR 周辺条件、および / または SED 周辺条件なども考慮される。しかし、このような種類の計算は非常に複雑で時間コストがかかり、結果が満足 of いくものでなかったり、不安定なことも少なくない。

10

#### 【先行技術文献】

#### 【非特許文献】

#### 【 0 0 1 1 】

【非特許文献 1】K. Setsompop 他著、「8 チャンネルにより 7 テスラで表出される平行高周波励起設計のための値の最小 2 乗最適化」、Magn. Reson. Med. 59: 908 から 915、2008 年

#### 【発明の概要】

#### 【発明が解決しようとする課題】

#### 【 0 0 1 2 】

20

本発明の課題は、特に最適化された  $k$  空間軌道の非常に迅速かつできる限りロバスト性の高い計算を実行するために、磁気共鳴システムの制御シーケンスを決定するための改良された方法を提供し、ならびに、これに対応する制御シーケンス決定装置を提供することである。

#### 【課題を解決するための手段】

#### 【 0 0 1 3 】

この課題は、本発明によれば、磁気共鳴システムから放出される少なくとも 1 つの高周波パルス列を含む磁気共鳴システムの制御シーケンスを決定する方法において、

目標磁化を検出するステップと、

目標磁化に基づいて  $k$  空間内のエネルギー分布関数を決定するステップと、

$k$  空間内のエネルギー分布関数を考慮して  $k$  空間軌道を決定するステップと、

H F パルス最適化法で  $k$  空間軌道について高周波パルス列を決定するステップとを含んでいる磁気共鳴システムの制御シーケンス決定方法によって解決される（請求項 1）。

30

#### 【 0 0 1 4 】

磁気共鳴システムの制御シーケンス決定方法に関する本発明の有利な実施態様は次の通りである。

- ・  $k$  空間内のエネルギー分布関数を決定するために目標磁化 ( $m$ ) のフーリエ変換が実行される（請求項 2）。

- ・  $k$  空間内のエネルギー分布関数を決定するために目標磁化が平均値減算される（請求項 3）。

40

- ・  $k$  空間内のエネルギー分布関数が変更され、 $k$  空間軌道の決定は、変更された  $k$  空間内のエネルギー分布関数を考慮して行われる（請求項 4）。

- ・  $k$  空間内のエネルギー分布関数が各空間区域にセグメント化され、個々の空間区域内でそれぞれ異なるように変更される（請求項 5）。

- ・ 前記セグメント化はエネルギー分布関数の極値に基づいて行われる（請求項 6）。

- ・  $k$  空間内のエネルギー分布関数が重み関数でスケールされる（請求項 7）。

- ・  $k$  空間内のエネルギー分布関数が個々の空間区域内でそれぞれ該当する空間区域に割り当てられた重み関数の値でスケールされる（請求項 8）。

- ・  $k$  空間内のエネルギー分布関数の次元が縮小される（請求項 9）。

50

・複数の $B_1$ マップが検出され、エネルギー分布関数の決定は $B_1$ マップに関係して行われ、および/または $B_0$ マップが検出され、エネルギー分布関数の決定は $B_0$ マップに関係して行われ、および/または $k$ 空間軌道の決定は予め定められた $k$ 空間軌道タイプを考慮して行われる(請求項10)。

・現在の $B_0$ マップに基づいておよび/または目標磁化に基づいて $k$ 空間内のエラー密度が解析関数によって算出され、 $k$ 空間軌道の決定はエラー密度を考慮して行われる(請求項11)。

#### 【0015】

本発明によれば、先ず本発明による方法で制御シーケンスが決定され、次に前記制御シーケンスを利用して磁気共鳴システムが作動される磁気共鳴システムの作動方法が提案される(請求項12)。

10

#### 【0016】

さらに、上述の課題は、本発明によれば、磁気共鳴システムから放出される少なくとも1つの高周波パルス列を含む磁気共鳴システムの制御シーケンスを決定する制御シーケンス決定装置において、

目標磁化を検出するための入力インターフェース装置と、

目標磁化に基づいて $k$ 空間内のエネルギー分布関数を決定するエネルギー分布決定ユニットと、

$k$ 空間内のエネルギー分布関数を考慮して $k$ 空間軌道を決定する軌道決定ユニットと、

$k$ 空間軌道について高周波パルス列を決定するHFパルス最適化ユニットと

20

を備える制御シーケンス決定装置によっても解決される(請求項13)。

#### 【0017】

本発明によれば、高周波送信装置と、グラジエントシステムと、予め定められた制御シーケンスに基づいて所望の測定を実施するために高周波パルス列を放出するとともに、この高周波パルス列と協調してグラジエントシステムを通じてグラジエントパルス列を放出するように構成された制御装置とを備える磁気共鳴システムにおいて、

制御シーケンスを決定してこれを前記制御装置へ送るために、本発明による制御シーケンス決定装置を有している磁気共鳴システムが提案される(請求項14)。

#### 【0018】

また、本発明によれば、コンピュータプログラムにおいて、制御シーケンス決定装置の記憶装置へ直接にロード可能であり、前記プログラムが前記制御シーケンス決定装置内で実行されるときに、本発明による方法のすべてのステップを実施するためのプログラムコードセグメントを有しているコンピュータプログラムも提案される(請求項15)。

30

#### 【0019】

本発明による方法では、まず所望の目標磁化が検出される。次いで本発明では、目標磁化に基づいて $k$ 空間内のエネルギー分布関数の決定が行われ、たとえば直接的な計算が行われる。このエネルギー分布関数は、 $k$ 空間内のそれぞれの位置に関して、相対的なエネルギーを反映している。その意味で、このエネルギー分布関数は空間的な「エネルギー密度関数」とも呼ぶことができる。これは、目標磁化を最善に実現するのに、どれだけ多くのエネルギーが最終的に $k$ 空間領域ごとに必要になるかの見積もりを表しているからである。

40

#### 【0020】

そして次のステップで、 $k$ 空間内のエネルギー分布関数を考慮して、 $k$ 空間軌道が決定される。このとき、 $k$ 空間内の1つの位置のエネルギーないしエネルギー密度が高ければ高いほど、その位置で軌道が稠密に推移すべきであるということを直接遵守することができ、その結果、所要の高いエネルギーコストが、それに応じて $k$ 空間内でできるだけ効率的に当該箇所へ投入される。ここで $k$ 空間軌道密度とは、さまざまに異なる軌道通過線が $k$ 空間内でどれだけ互いに稠密に位置しているかを意味しており、たとえば、直線状の(直線の)軌道を有するEPI軌道の場合には、平行に延びる隣接する2本の線がどれだけ稠密に位置しているかを意味しており、あるいは螺旋軌道の場合には、軌道が1つの周回

50

線から次の周回線へとどれだけ互いに稠密に通過するかを意味しており（すなわち、それぞれの場所で2つの周回線の間に存在しているリード）、あるいはラジアル軌道の場合には、2つのスポークの間の角度がどれだけ狭く位置しているかを意味している。

【0021】

次いで、 $k$ 空間軌道についての高周波パルス列の決定がHFパルス最適化方法で行われ、たとえば、同じく予め定められた $B_1$ マップ等に基づいている予め定められた目標磁化に基づいて行われる。このとき高周波パルス列の決定は、開始してすぐに $k$ 空間軌道が固定的に設定される従来式の方法と同じように行うことができる。

【0022】

本発明による方法の1つの決定的に重要な点は、目標磁化によって実現可能であるエネルギー分布関数が、目標磁化から直接的に算出されることにある。したがって、たとえば所望の目標磁化を最善に生じさせるエネルギー分布を $k$ 空間内で実現するために、 $k$ 空間軌道を決定論的に決定することができる。すなわち、密度が用途固有に適合化された、すなわちオーダーメードで作成される、送信 $k$ 空間軌道の決定のために、従来式の軌道デザインが新規のメトリックで置き換えられる。この場合、見逃し誤り率等に基づく最小化手順や反復式の方法は必要ではなく、その代わりに、決定論的なメトリックと解析的または数値的な計算が適用される。特に、高周波パルス列の決定にあたって、他の周辺条件や正則化された最適化方式も必ずしも必要ではない。主要な問題は、すでに高周波パルス最適化の前に、すなわち適当な $k$ 空間軌道を決定するときに、考慮に含まれているからである。このとき可変の $k$ 空間軌道密度を算出するためのメトリックは、何よりもまず第1に、空間的な目標磁化に関する情報を含んでいる。

【0023】

このように、本発明の方法は計算に関して特別に迅速であり、そのうえ特別にロバスト性も高い。したがって、このことは全体として測定全体における画像品質を維持しながら、またはこれを改善しながら、速度の利点につながるとともに高周波制限の遵守につながり、特に高周波負荷の低減につながる。

【0024】

本発明による制御シーケンス決定装置は、一方では、目標磁化を検出するための入力インターフェース装置を含んでいる。これは複数の異なるインターフェースからなる構造であってよく、たとえば目標磁化だけでなく、たとえば所望の予め定められた $k$ 空間軌道タイプ、現在の $B_0$ マップ、現在の $B_1$ マップ等のその他の情報も検出する。同様にこれは、複数のデータ型式を受け取ることができる複合型のインターフェースであってもよい。ここでデータの検出とは、たとえばユーザーインターフェースやデータバンクを備える記憶装置ユニットのような、磁気共鳴システムの他のコンポーネントからのデータの受取を意味しており、ないしは、磁気共鳴システムの測定装置や再構成装置から受取を意味している。

【0025】

それに応じて入力インターフェース装置は、たとえば目標磁化および場合により $k$ 空間軌道タイプを手動入力するためのユーザーインターフェースであってよく、特にグラフィックユーザーインターフェースであってもよい。あるいはこれは、制御シーケンス決定装置の内部に配置された、またはネットワークを介してこれと接続された、データ記憶装置からデータを（場合によりやはりユーザーインターフェースを利用した上で）選択して受け取るためのインターフェースであってもよい。

【0026】

さらに制御シーケンス決定装置は、目標磁化に基づいて $k$ 空間内のエネルギー分布関数を決定するエネルギー分布決定ユニットと、 $k$ 空間内のエネルギー分布関数を考慮して $k$ 空間軌道を決定する軌道決定ユニットとを必要とする。

【0027】

最後に、 $k$ 空間軌道のための高周波パルス列を決定するHFパルス最適化ユニットが必要とされる。さらに制御シーケンス決定装置は、磁気共鳴断層撮影システムの他の制御ユ

10

20

30

40

50

ニットへ制御シーケンスを引き渡すために、適当な制御シーケンス出力インターフェースを有しているのがよい。制御シーケンス出力インターフェースは、たとえば磁気共鳴制御部へ制御シーケンスを伝送し、それによって測定を直接的に制御するためのインターフェースであってよく、あるいは、ネットワークを通じてデータを送り、および／または後の使用のために記憶装置に保存するインターフェースであってよい。

#### 【0028】

本発明による磁気共鳴システムの作動方法では、上に説明した方法に基づいて制御シーケンスが決定され、次いで、この制御シーケンスを利用して磁気共鳴システムを作動させる。それに応じて、冒頭に述べた種類の本発明の磁気共鳴システムは、上に説明した制御シーケンス決定装置を有している。

10

#### 【0029】

制御シーケンス決定装置の主要部分は、ソフトウェアコンポーネントとして構成されていてよい。これが特に該当するのは、エネルギー分布決定ユニット、軌道決定ユニット、およびHFパルス最適化ユニットである。同様に、上記の各インターフェースも少なくとも部分的にソフトウェアとして構成されていてよく、場合により存在するコンピュータのハードウェアインターフェースを援用することができる。このように本発明は、制御シーケンス決定装置でプログラムが実行されるときに本発明による方法のすべてのステップを実施するためのプログラムコードセグメントを含む、制御シーケンス決定装置の記憶装置へ直接的にロード可能なコンピュータプログラムも含んでいる。このようなソフトウェア式の具体化は、迅速かつ高いロバスト性で最適化された制御シーケンスを本発明の方式で決定するために、制御シーケンスを決定するために用いられている従来式の装置（たとえば磁気共鳴システム製造者の計算センターにある適当なコンピュータ）を、プログラムのインプリメントによって適切な仕方に変更することができるという利点がある。

20

#### 【0030】

従属請求項ならびに以下の説明は、本発明の特別に好ましい発展例と実施形態を含んでおり、特に1つのカテゴリーの請求項は、他の請求項カテゴリーの請求項に準じてさらに改良されていてよい。

#### 【0031】

位置空間から $k$ 空間への目標磁化のフーリエ変換がまず実行されることによって、目標磁化に基づいて行なわれる $k$ 空間内のエネルギー分布関数の比較的迅速な決定が可能である。このようなフーリエ変換は二次元で、すなわち位置空間内のそれぞれ個々のスライスについて行うことができ、あるいは、位置空間内の三次元の体積部について三次元で行うこともできる。このとき高速フーリエ変換が利用されるのが好ましい。

30

#### 【0032】

$k$ 空間内のエネルギー分布関数の決定は、平均値減算された目標磁化に基づいて行われるのが特別に好ましい。「平均値減算」とは、目標磁化データすなわち位置に関する磁化値またはフリップ角値から、スライス全体についての平均値ないしは変換されるべき体積全体の平均値をそれぞれ減算するという意味である。そしてこのような平均値減算された目標磁化を、エネルギー分布関数を得るために、特に上に説明したようにフーリエ変換によって、 $k$ 空間に変換することができる。平均値減算された目標磁化の適用は、 $k$ 空間中心部における通常は非常に高いピークがフェードアウトされ、または少なくとも大幅に低減されるという利点がある。このようにして、高周波のディテールをより良く検知可能である。

40

#### 【0033】

本発明の特別に好ましい態様では、 $k$ 空間内のエネルギー分布関数がまず変更されてから、この変更されたエネルギー分布関数を考慮して $k$ 空間軌道の決定が行われる。変更のためにさまざまな選択肢がある。特定の効果を実現するために、たとえばエネルギー分布関数をスケールリングし、および／または歪ませることができる。

#### 【0034】

$k$ 空間内のエネルギー分布関数は、 $k$ 空間に関する複数の空間区域にセグメント化ない

50



し分割されるのが特別に好ましい。そして個々の空間区域内で、エネルギー分布関数をそれぞれ互いに異なるように変更する、すなわちスケーリングし、または重み付けし、またはシフトさせることなどができる。

【0035】

1つの特別に好適な選択肢では、エネルギー分布関数のセグメント化を実行するために、エネルギー分布関数の極値が利用される。たとえばセグメント化は、各々のセグメントにちょうど1つの( $k$ 空間に関して局所的な)最大値が存在するように行うことができる。個々のセグメントの分離はたとえば( $k$ 空間内の局所的な)最小値のところで行うことができる。このようなセグメント化は非常に簡単に実行することができ、それは、まず $k$ 空間内でエネルギー分布関数の極値が探索され、次いで、これに応じて各セグメントの分割が2つの最大値の間の最小値のところでそれぞれ行われることによる。当然ながら、たとえば最小値のところにセグメント境界が延びており、セグメントごとに1つの最小値が存在するようにセグメント化を実行することも原則として可能である。

【0036】

エネルギー分布関数は、 $k$ 空間内での変更のために重み関数によってスケーリングされるのが好ましい。

【0037】

それにより、周波数の高い領域があまりに著しく過小に表現されることがないように配慮することができる。通常、エネルギー分布関数はエネルギーが高いとき、低い周波数に比べて強く減衰するからである。これは、 $k$ 空間中心部の最大値から外方に向かって降下していく、 $B_0$ 分布および/または現在の $B_1$ マップに関係しない予め定められた窓関数であるのが好ましい。1つの特別に好ましいエネルギー分布関数はハニング窓関数である。別の好ましい重み関数は、ガウス関数、ヘミング関数、あるいは、たとえばエネルギーコストと空間分解能の間の最善の妥協を提供する関数である。

【0038】

エネルギー分布関数のセグメント化が行われている場合、 $k$ 空間内のエネルギー分布関数は個々の空間区域で、それぞれ該当する空間区域に割り当てられた重み関数の値によってスケーリングされるのがきわめて特別に好ましい。そのようにして、たとえばエネルギー分布関数のそれぞれ1つの特定の空間区域を、該当する空間区域の最大値の場所で重み関数が有している値によってスケーリングすることができる。

【0039】

特にエネルギー分布関数が区域ごとに、すなわち個々の空間区域で、それぞれ互いに異なるように重み付けされる場合、それぞれの空間区域ないしセグメントの分離が、エネルギー分布関数の最小値のところで行われると利点が得られる。各セグメントの間の境界では、重み付けの後で、それぞれのセグメント区域に段部を有さない平滑なエネルギー分布関数を再び得るための適合化が行われるとよいからである。しかしこのような平滑化は、最小値のところでは最大値のところほど大きな意味がなく、その理由は、もともとこのような最小値は、後でアンダーサンプリングが行われる $k$ 空間内の個所ということにある。それは、エネルギー分布関数を考慮して $k$ 空間軌道が決定され、したがって、エネルギー最小値の個所では $k$ 空間軌道が最大値のところほど稠密に位置していないからである。

【0040】

2つのセグメントの間での平滑化は、公知の移動平均法(移動する平均値)によって、またはその他のローパスフィルタによって行うことができる。

【0041】

$k$ 空間内のエネルギー分布関数を決定するときのコストを削減するために、 $k$ 空間内のエネルギー分布関数の次元を縮小することができるのが好ましい。特別に好ましい1つの選択肢は、まず、通常はフーリエ変換の後で $k$ 空間内のデカルト座標に存在するエネルギー分布関数を、極座標変換によって極座標へ変換することにある。次いで、最大値投影を実行することができる。これら2つのステップは、エネルギー分布関数の次元の回転不変な縮小である。たとえばエネルギー分布関数がまず2次元の $k$ 空間で、すなわち平面的に

10

20

30

40

50

定義されれば、そのようにして、まず極座標への変換を半径と角度に関して行うことができ、次いで、最大値投影によって半径への縮小を行うことができる。このことは特に、理想的な螺旋軌道を探すときに有意義である。その場合、まず第1に半径方向における軌道の密度を決めることになるからである。これに類似の仕方では、残りの極座標としての角度への縮小を実現することができ、それにより、たとえば2本のスポークの間の角度に関係して空間密度が決まるラジアル軌道を定めるために、角度に関係してエネルギー分布関数を行うことができる。

#### 【0042】

高周波パルスは、従来どおりただ1つの送信チャネルを介して放出され、次いで、適当な仕方では全身コイルに供給される。その際には、たとえば高周波信号を分割し、部分信号を90°だけ相互に振幅シフトおよび位相シフトさせ、これに応じて空間的にオフセットさせて、バードケージアンテナとして構成された全身コイルへ供給することが可能であり、それにより、円形（位相のみ）または楕円形（振幅と位相）に分極された、最善のケースでは均一である $B_1$ 磁場が放出される。

#### 【0043】

最近の磁気共鳴システムでは、個々の送信チャネルを、たとえばバードケージアンテナの個々のロッドを、画像化に合わせて適合化された個別的なHF信号で覆うことが可能となっている。そのために、それぞれ独立した異なる高周波送信チャネルを介してパラレルに放出することができる複数の個別の高周波パルス列からなるマルチチャネルパルス列が放出される。このようなマルチチャネルパルス列は、個々のパルスがパラレルに放出されるので「pTxパルス」とも呼ばれており、励起パルス、再集束パルス、および/または反転パルスとして利用することができる。このようなマルチチャネルパルス列をパラレル励起方式で開発するための方法は、たとえばW. Grissom他著「マルチコイルパラレル励起におけるRFパルスの設計のための空間ドメイン法」(Mag. Res. Med. 56, 620-629, 2006)に記載されている。

#### 【0044】

本発明による方法は、このようなpTx方式の枠内で特別な利点を提供するので、本方法は、本発明に基づいて作成された磁気共鳴システムの制御シーケンスが、磁気共鳴断層撮影システムによりそれぞれ独立して異なる高周波送信チャネルを介してパラレルに放出されるべき複数の個別のHFパルス列を有するマルチチャネルパルス列を含むように適用されるのも好ましい。その場合、マルチチャネルパルス列の決定は、 $B_1$ 磁場の分布をそれぞれ個々の送信チャネルについて表す $B_1$ マップに基づいて行われるのも特別に好ましい。

#### 【0045】

あるいは原則として本方法は、1つの送信チャネルを有する従来型の方法やシステムとの関連でも非常に良好に適用可能であり、この場合、場合により現在の $B_1$ マップは別途に測定されるのではなく、仮定ないしモデリングによって作成される。同様に本方法は、動的パルスを有するいわゆる「 $B_1$ シミング」の枠内でも適用可能であり（たとえばスポーク）、この場合、1つの予め定められた基本高周波パルスがさまざまに異なる送信チャネルへ、それぞれのスポークの異なる設定可能な振幅重み付けと位相シフトとをもって供給され、それにより、たとえば $B_1$ 磁場の均一化を実現する。

#### 【0046】

決定されたエネルギー分布関数に基づいて、理想的なk空間軌道タイプを自動的にすることも可能であるのが好ましい。このようなk空間軌道タイプによってk空間軌道の種類が表され、たとえば、それが螺旋軌道であるのか、EPIシーケンス(EPI = Echo Planar Imaging、エコープラナーイメージング)のための直線軌道であるのか、同心的に回転するスポークを有するいわゆるラジアル軌道であるのか等が表される。それにより、まず基本タイプだけが指定される。次いで、本発明による方法においてさらに別のパラメータも決定されるが、それは、決定された軌道タイプの最善の軌道を得るためであり、たとえば、螺旋軌道の局所的に相違するピッチを得るためであり、ま

10

20

30

40

50

たは、EPI軌道のそれぞれ隣接する軌跡の間隔を得るためである。あるいは別案として、たとえば開始時に、たとえば測定プロトコルからの受取によって、または操作者がk空間軌道タイプを入力したユーザーインターフェースからの受取によって、所望のk空間軌道タイプを検出することもできる。

【0047】

k空間軌道を決定する本発明による方法が、他の方法と組み合わせられるのも好ましい。

【0048】

上で説明したとおり、原則としてk空間内のエネルギー分布関数は、まず目標磁化だけに基づいて算出される。しかしこれに加えて、 $B_0$ マップに基づいてエネルギー分布関数の算出を行うこともでき、それにより、 $B_0$ 磁場の不均一性によって引き起こされる周波数偏差すなわちオフ共鳴が、エネルギー分布関数で自動的に考慮に含まれることになる。

【0049】

たとえばこれに加えて、現在の $B_0$ マップに基づいて、および/または目標磁化に基づいて、解析関数またはエラーメトリックを用いてk空間内のエラー密度の算出を行うこともできる。このような解析関数は、現在の $B_0$ マップおよび/または目標磁化に関して、k空間内のエラー密度を定める。ここで「エラーメトリック」とは、k空間エラー密度と、 $B_0$ マップないし目標磁化との間の定量的な関数関係を意味している。換言するとこのようなエラーメトリックは、 $B_0$ マップないし目標磁化と、探索されるk空間エラー密度との間の定められた解析関係を含んでいる。

【0050】

そして、このようなエラー密度を考慮して、たとえば解析計算によって、k空間内のエネルギー分布関数に基づいて上述の方法で決定されるk空間軌道をいっそう最適化することができる。このとき本発明によるk空間軌道は、たとえば生じる可能性があるk空間内の誤差が特別に大きい領域（いわゆる「エラーホットスポット」）で、軌道密度ができるだけ低くなるように、すなわち、 $B_0$ 不均一効果がもっとも強いk空間内の個所がたとえば回避されるように、変更することができるのが好ましい。

【0051】

エラー密度に基づいて特定の軌道タイプの最適化されたk空間軌道を決定する方法は、たとえば独国特許出願第102012212376.8号明細書に記載されており、その限りにおいて同文献の内容をここに援用する。

【0052】

同様に、k空間軌道を決定する本発明の方法は、他の公知の方法とも組み合わせることができる。

【0053】

k空間軌道は、作成された磁気共鳴システムの制御シーケンスを用いて磁気共鳴システムが制御されるときに、k空間がアンダーサンプリングされるように決定されるのが特別に好ましい。このことが特に有意義なのはpTXシステムが使用される場合である。その場合、巧妙なアンダーサンプリングによって、およびこれと同時にパラレル送信法を利用することで、励起の加速およびそれによる測定の加速が可能だからである。

【0054】

たとえば、きわめて好ましい1つの態様では、たとえばいわゆるTX-SENSE法（SENSE = sensitivity encoding）により、少なくとも部分領域でk空間を規則的なパターンでアンダーサンプリングすることができる。このとき少なくとも部分領域で送信k空間は規則的なパターンで、たとえば特定の係数（たとえば2倍、3倍、4倍）だけ均等に、アンダーサンプリングされ、その際に、これに対応する数の高周波チャネルとパラレルに送信される。特にこの方法では、 $B_1$ マップに由来する情報を利用するのが有意義であり、さまざまに異なるチャネルの $B_1$ マップが、少なくとも部分的に直交するという条件が課されるのが好ましい。

【0055】

さらに別の特別に好ましい方法では、k空間のアンダーサンプリングは少なくとも部分

10

20

30

40

50

的に不規則なパターンおよび／またはランダムに行われ、このことは、たとえばいわゆる「圧縮センシング」法との関連で可能である。

【0056】

さまざまな方法を実施できるようにするために、 $k$ 空間軌道の決定は、少なくとも別の検査固有ないし検査タイプ固有のパラメータに基づいて、および／または装置固有ないし装置タイプ固有のパラメータに基づいて行われるのも好ましい。これには、次の装置固有のパラメータのうちの少なくとも1つが属しているのが好ましい。第1に送信チャネルの数が関心の対象となり、これは特に、たとえばTX-SENSE法の枠内でアンダーサンプリングが行われるべき場合である。

【0057】

さらに $k$ 空間軌道の決定は、磁気共鳴断層撮影システムの内部で最大限実現可能な、および／またはたとえば安全限度に基づいて許容される、グラジエント振幅に基づいて行うことができる。

【0058】

同様に $k$ 空間軌道の決定は、最大限実現可能な、および／または許容されるグラジエントスルーレート（すなわち、同じく患者に対して負荷されてよいグラジエントパルスの増加率または減少率）を考慮して行うことができる。

【0059】

実際問題として $B_0$ 磁場分布は、たとえば装置の不安定性および／または患者、被検体の運動や生理状態（たとえば呼吸、心拍）によって、時間とともに動的に変化することがある。そのために、画像化やアーチファクトにあたって、特に機能画像化（fMRI）にあたって、ならびに灌流画像化や拡散強調画像化にあたって、典型的な不安定性問題が発生することがある。したがって、本発明による方法で追加の $B_0$ マップが適用される場合には、測定中に、すなわち通常複数回の撮影が行なわれる、すなわち複数の測定シーケンスが進行する1回の測定において、新たに現在の $B_0$ マップが検出され、この $B_0$ マップに基づいて、以後に測定で適用される少なくとも1つの磁気共鳴システムの制御シーケンスについて新たな $k$ 空間軌道が決定されるのが特別に好ましい。このことは、たとえば規則的な時間間隔で反復して行うことができ、または、不規則な間隔を置いて行うことができる。同様に、イベント制御式の新規測定を行うこともでき、これはたとえば、MR信号（内部）または外部センサ（たとえば運動センサ、磁界センサ）によってそれが検知された場合である。

【0060】

本発明による方法は任意の軌道タイプで適用可能であり、特に好ましくはEPI軌道または螺旋ジオメトリ、あるいはスポークポジションジオメトリ、ラジアルジオメトリ、あるいはフリーフォームジオメトリで適用可能である。

【0061】

HFパルス最適化法における高周波パルス列の算出は、まず比較的低い目標磁化について行われるのが特別に好ましい。次いで、その際に決定されたマルチチャネルパルス列が、最終的な目標磁化になるようにアップスケーリングされ、および場合によりもう一度再修正される。このような方式のために、低い磁化については、すなわちたとえば $0^\circ$ から $5^\circ$ の間の小さいフリップ角については（いわゆる「ローフリップ領域」では）、磁化挙動がまだ線形であることが活用される。したがってこの領域では、最適化方法による計算が著しく簡単かつ迅速である。この領域について最善のマルチチャネルパルス列が見出されていれば、その次のステップで、アップスケーリングが容易に可能である。たとえばローフリップ領域での計算が最大 $=5^\circ$ のフリップ角について行われ、本来の磁化は最大 $90^\circ$ のフリップ角で行われるべきであるとする、これらのフリップ角の比率に準じて、HFパルスの振幅値を1.8倍することができる。そのとき場合により発生する誤差は、引き続き、シミュレーションの一環で決定して修正することができる。

【0062】

本方法においては、本発明による $k$ 空間軌道の最適化に加えて、従来式のHFパルス最

10

20

30

40

50

適化法による最善の高周波パルス列の決定も実施することができるので、その際に、特に検査対象の生理的なHF負荷値に関わる別のパラメータも最適化できるのが好ましい。たとえばHFパルス最適化に利用されるパラメータ、あるいはその他のシステムパラメータ、たとえば最大のグラジエント強度や立ち上がり時間などを、最適化の枠内で後からまた変更することができ、そのようにして、SAR値ないしSED値に関して最適化された結果を得る。

【0063】

次に、添付の図面を参照しながら、複数の実施例を用いて本発明を再度詳しく説明する。

【図面の簡単な説明】

10

【0064】

【図1】本発明による磁気共鳴システムの一実施例を示す模式図である。

【図2】制御シーケンスを決定する本発明の方法の一実施例についてのフローチャートである。

【図3】図2の方法でk空間軌道を決定する本発明の方法の一実施例についてのフローチャートである。

【図4】位置空間内の二次元スライスにおける目標磁化の一例を示す図である。

【図5】図4の目標磁化に基づいている、k空間内のデカルト座標系におけるエネルギー分布関数の一例を示す図である。

【図6】k空間内の極座標に変換した後の図5のエネルギー分布関数を示す図である。

20

【図7】1つの次元に縮小された図6のエネルギー分布関数とセグメント化ラインを示す図である。

【図8】エネルギー分布関数を重み付けするための重み関数の一例を示す図である。

【図9】図8の重み関数で部分的に重み付けされた図7のエネルギー分布関数を示す図である。

【図10】図9のエネルギー分布関数を考慮して最適化された、螺旋状のk空間軌道の半径の推移を時間に関係して示す図である。

【図11】図9の半径方向の推移を考慮して作成された螺旋状のk空間軌道を示す図である。

【図12】従来技術に基づく均等なピッチを有する通常の螺旋状のk空間軌道を示す図である。

30

【図13】ハニング窓関数での重み付けによって生成されたピッチを有する、図12の螺旋状のk空間軌道を示す図である。

【図14】図11、図12、および図13の螺旋状のk空間軌道のさまざまなパフォーマンスパラメータを比較した図である。

【図15】位置空間内の二次元スライスにおける目標磁化の別の例（左上）、これに基づいて作成された、k空間内のデカルト座標におけるエネルギー分布関数（右上）、これに合わせて最適化された螺旋状のk空間軌道（左下）、およびエネルギー分布関数とk空間軌道との重ね合わせ（右下）をそれぞれ示す図である。

【図16】位置空間内の二次元スライスにおける目標磁化の別の例（左上）、これに基づいて作成された、k空間内のデカルト座標におけるエネルギー分布関数（右上）、これに合わせて最適化されたEPI k空間軌道（左下）、およびエネルギー分布関数とk空間軌道との重ね合わせ（右下）である。

40

【図17】さまざまなEPI k空間軌道について、図14のさまざまなパフォーマンスパラメータを比較して示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0065】

図1には、本発明による磁気共鳴設備1が大まかに模式的に示されている。この磁気共鳴設備は、一方では、本来の磁気共鳴スキャナ2およびその中にある検査室8ないし患者用トンネルを含んでいる。寝台7はこの患者用トンネル8の中へ送り込むことが可能であ

50

り、それにより、その上に載っている検査対象O（患者、被検体）は検査中に磁気共鳴スキャナ2の内部で、その中に配置された磁気システムおよび高周波システムに対して相対的に特定の位置で支持することができ、ないしは、測定中にさまざまな位置の間で移動可能である。

【0066】

磁気共鳴スキャナ2の主要コンポーネントは、基本磁場磁石3と、x方向、y方向、およびz方向で任意の磁場グラジエント（傾斜磁場）を印加するための磁場グラジエントコイルを備えたグラジエントシステム4と、全身高周波コイル5である。検査対象O内で誘導される磁気共鳴信号の受信は全身コイル5を介して行うことができ、この全身コイルによって、通常、磁気共鳴信号を誘導するための高周波信号も放出される。ただし普通は、たとえば検査対象Oの上側または上方に位置する局所コイル6によってこの信号が受信される。これらのコンポーネントはすべて当業者に基本的に知られており、したがって図1では大まかに模式的にしか図示していない。

【0067】

全身高周波コイル5は、ここではいわゆるバードケージアンテナとして構成されており、患者用トンネル8と平行に延び、患者用トンネル8を囲む円周上で均等に配分されて配置されたN個の個々のアンテナロッドを有している。個々のアンテナロッドは端部側で、それぞれ容量的に環状に結合されている。個々のアンテナロッドは、ここでは個々の送信チャンネル $S_1, \dots, S_N$ として制御装置10により別々に制御可能であり、すなわち、この磁気共鳴断層撮影システムはpTx対応のシステムである。ただし明文をもって付記しておく、本発明による方法は、ただ1つの送信チャンネルをもつ従来型の磁気共鳴断層撮影装置にも好ましく適用可能である。ただし、本発明の方法はpTxシーケンスで特別な利点を提供するので、以下においては（一般性を限定することなく）、別段の断りがない限りこのような例を前提とする。

【0068】

制御装置10は、複数の（場合により空間的にも離れて適当なケーブル等を介して相互に接続された）個別コンピュータで構成されていてよい制御コンピュータであってよい。端末装置インターフェース17を介して、この制御装置10は端末装置20と接続されており、操作者はこの端末装置を通じて設備1全体を制御することができる。本例では、この端末装置20はキーボードと、1つまたは複数のスクリーンと、たとえばマウス等のさらに別の入力機器とを備えるコンピュータとして構成されており、それにより、グラフィックユーザーインターフェースが操作者に提供される。

【0069】

制御装置10は、特に、同じく複数の部分コンポーネントから構成されていてよいグラジエント制御ユニット11を有している。このグラジエント制御ユニット11を通じて、個々のグラジエントコイルに制御信号 $SG_x, SG_y, SG_z$ が送られる。これは測定中に厳密に設定された時間的な各位置で、かつ厳密に設定された時間的推移でセットされるグラジエントパルスである。

【0070】

さらに制御装置10は、高周波送信/受信ユニット12を有している。このHF送信/受信ユニット12は、同じく複数の部分コンポーネントで成り立っており、それにより個々の送信チャンネル $S_1, \dots, S_N$ に、すなわちボディコイルの個々の制御可能なアンテナロッドに、高周波パルスをそれぞれ別々にパラレルに印加する。送信/受信ユニット12を通じて磁気共鳴信号を受信することもできる。しかし通常、このことは局所コイル6を用いて行われる。このような局所コイル6で受信された生データRDが、HF受信ユニット13によって読み取られて処理される。局所コイルまたは全身コイルからHF送信/受信ユニット12によって受信される磁気共鳴信号は、生データRDとして再構成ユニット14へと伝送され、この再構成ユニットがこれに基づいて画像データBDを再構成し、これを記憶装置16に格納し、および/またはインターフェース17を介して端末装置20に伝送し、それによって操作者がこれを見ることができる。画像データBDは、ネットワ

ークNWを通じて他の場所で保存することもでき、および／または表示、評価することもできる。局所コイルが適当な切換ユニットを有している場合には、局所コイルを送信用としても利用するために、この切換ユニットがHF送信／受信ユニットに接続されていてもよい。

#### 【0071】

グラジエント制御部11、HF送信／受信ユニット12、および局所コイル6のための受信ユニット13は、それぞれ測定制御ユニット15によって協調制御される。この測定制御ユニット15は相応のコマンドにより、所望のグラジエントパルス列GPが適当なグラジエント制御信号SG<sub>x</sub>、SG<sub>y</sub>、SG<sub>z</sub>により放出されるように作用するものであり、HF送信／受信ユニット12を平行に制御してマルチチャネルパルス列MPが放出されるようにし、すなわち個々の送信チャネルS<sub>1</sub>、...、S<sub>N</sub>で、適当な高周波パルスが全身コイル5の個々の送信ロッドへ平行に与えられるようにする。さらに、適当な時点で局所コイル6の磁気共鳴信号がHF受信ユニット13によって、ないしは場合により全身コイル5の信号がHF送信／受信ユニットによって、それぞれ読み取られて後処理される。測定制御ユニット15は予め定められた制御プロトコルPに基づいて相応の信号を、特にマルチチャネルパルス列MPを、高周波送信／受信ユニット12に設定し、また、グラジエントパルス列GPをグラジエント制御ユニット11に設定する。この制御プロトコルPには、測定中に設定されなければならないすべての制御データが格納されている。

#### 【0072】

通常、記憶装置16にはさまざまな測定のための多数の制御プロトコルPが格納されている。これらの制御プロトコルは、端末装置20を通じて操作者により選択され、場合により変更することができ、それにより、現在所望の測定のための適当な制御プロトコルPを提供し、これによって測定制御ユニット15を作動させることができる。そのほかに操作者は、ネットワークNWを通じて制御プロトコルをたとえば磁気共鳴システムの製造者から呼び出して、これを場合により変更して使用することもできる。

#### 【0073】

しかし、このような磁気共鳴測定の基本的な進行と、制御をするための上記の各コンポーネントとは当業者には周知であるので、ここでこれ以上詳細に述べることはしない。なお、このような磁気共鳴スキャナ2ならびにこれに付属する制御装置は、さらに別の多数のコンポーネントを有することができるが、これについても同じくここでは詳細に説明しない。ここで指摘しておく、磁気共鳴スキャナ2は、たとえば側方で開いた患者室を備えるように、上記とは異なるように構成されていてもよく、また、原則として高周波全身コイルはバードケージアンテナとして構成されていなくてもよい。

#### 【0074】

さらにこの図1には、磁気共鳴システムの制御シーケンスASを決定する本発明による制御シーケンス決定装置22が模式的に示されている。この磁気共鳴システムの制御シーケンスASは、特に特定の測定について、k空間内の特定の軌道を通過させるために、グラジエントパルス列を含むパルスシーケンスを含んでおり、ならびに、個々の送信チャネルS<sub>1</sub>、...、S<sub>N</sub>を制御するために、グラジエントパルス列と協調した高周波パルス列、本例ではマルチチャネルパルス列MPを含んでいる。磁気共鳴システムの制御シーケンスASは、本例では、測定プロトコルPの一部として作成される。

#### 【0075】

制御シーケンス決定装置22は、ここでは端末装置20の一部として示されており、この端末装置21のコンピュータでソフトウェアコンポーネントとして具体化されている。しかしながら原則として、制御シーケンス決定装置22は制御装置10自体の一部であってもよく、あるいは別個の計算システムで具体化されていてもよく、完成した制御シーケンスASは、場合により完全な一式の制御プロトコルP内で、ネットワークNWを通じて磁気共鳴システム1に伝送される。制御シーケンス決定装置22自体が制御装置10の一部であるとき、または、高速接続を介して端末装置20と、もしくは十分な計算容量をもつ適当な高速コンピュータと接続されているとき、好ましいケースでは測定実施中に

も、すなわち患者の検査の進行中にも、現在の前提条件に基づいて、たとえば更新された  $B_0$  マップに基づいて、現在の新しい制御シーケンスを決定することができる。

【0076】

ここでは制御シーケンス決定装置 22 は、入力インターフェース 23 を有している。この入力インターフェース 23 を介して、制御シーケンス決定装置 22 は一方では、所望の測定のためにフリップ角分布がどのようになるべきかを設定する目標磁化  $m$  を受け取り、ならびに場合により  $B_0$  マップ  $B_0$ 、ならびに場合により後でまた図 2 との関連で詳しく説明するその他の入力パラメータを受け取る

こうして得られたデータは、後でまた詳しく説明するように  $k$  空間内のエネルギー分布決定関数を決定するエネルギー分布決定ユニット 24 へまず転送される。そしてこれに続く軌道決定ユニット 25 が、この  $k$  空間内のエネルギー分布決定関数に基づいて、最善の  $k$  空間軌道  $k(t)$  を決定する。そして HF パルス最適化ユニット 26 で、この軌道について最善の高周波パルス列  $MP$  を決定することができる。

【0077】

そして、これらのデータが制御シーケンス出力インターフェース 27 を介して再び出力されて、たとえば磁気共鳴システム 1 の制御のためのさらに別の設定事項（たとえば生データから画像を再構成するためのパラメータなど）が指定される制御プロトコル  $P$  内で、制御装置 10 へ送ることができる。測定実施の過程で制御シーケンス  $AS$  が更新されるべきであるときには、このことも制御プロトコル  $P$  に記憶されていてよく、それにより、新たな制御シーケンス  $AS$  が制御装置 10 により適切な時点で自動的に本発明の方式で決定され、または、たとえば端末装置 20 またはその他のコンピュータに対して要請される。

【0078】

次に、磁気共鳴システムの制御シーケンス  $AS$  を決定する本発明の方法の進行手順について、図 2 のフローチャートを参照しながら、非常に単純な例を取りあげて説明する。

【0079】

まずステップ I で、以後の手順内で用いられるさまざまなパラメータが設定され、ないしは受け取られる。たとえばステップ Ia で、送信チャネルの数、最大のスルーレート、最大のグラジエント振幅等のようなシステム固有のパラメータが受け取られ、ステップ Ib で、撮影されるべきスライスの位置決め等のようなさまざまな検査固有のパラメータが受け取られ、ステップ Ic で、個々の送信チャネルについて  $B_1$  マップが受け取られる。さらにステップ Id で、上で説明したように、基本磁場の不均一性により引き起こされるオフ共鳴を位置に関係して反映する、測定された現在の  $B_0$  マップ  $B_0$  が設定されていてよい。このような不均一性は特に患者の身体によって引き起こされ、たとえば患者が動いたときに変化することがある。さらにステップ Ie で、所望の目標磁化  $m$  が設定される。最後にステップ If で、任意選択により、 $k$  空間軌道タイプ  $kTT$  を設定することができる、たとえば、それが直線状の EPI 軌道なのか、螺旋軌道なのか、ラジアル軌道なのか等を設定することができる。このことは、選択される制御プロトコルによって行うこともできる。軌道はしばしば測定の形式に関係して決まるからである。しかしながら、すでに述べたとおり、最善の  $k$  空間軌道タイプ  $kTT$  は、本方法において自動的に決定することもできる。従来の方法では必ず厳密な  $k$  空間軌道が設定されることを別にすれば、上記以外の入力事項ないしデータの受取は、従来の方法と同じように行うことができる。これらの方法ステップの順序は任意である。

【0080】

ステップ II で、最適化された  $k$  空間軌道  $k(t)$  が本発明に基づいて決定される。この方法ステップについては、図 3 との関連で後でまた詳しく説明する。

【0081】

そしてステップ III で高周波パルス列の設計、ここではマルチチャネルパルス列の設計が自動的に行われる。このとき、個々の HF パルスシーケンスがそれぞれ異なる送信チャネルについて展開され、すなわち、どの HF パルス形状がどのチャネルで送信されなければならないかが正確に算出される。このことはまず、フリップ角が  $5^\circ$  よりも小さい

10

20

30

40

50



わゆる「ローフリップ領域」について行われる。この領域では、磁化挙動がまだ線形に進行するからである。その際には反復式の最適化方法が適用される。そのような最適化方法が、特別に好適であることが判明しているからである。具体的には、ここではいわゆる共役グラジエント法（CG法；英語 *conjugate gradients*。共役勾配法ともいう）。が適用される。しかしながら原則としてこれ以外の最適化方法も、反復式ではないものも含めて適用可能である。このことは任意の方法で行うことができる。従来知られている多くの方法では、最適化方法は、たとえば目標磁化と実際磁化との間の最小二乗平均（Least - Mean - Square）が最小になるように行われる。すなわち次の解が探される。

【0082】

【数1】

$$\min(\|m_{ist} - m\|^2)$$

【0083】

ここで、 $m$ は目標磁化、 $m_{ist} = A \cdot b(t)$ はHFパルス列 $b(t)$ により実現される（理論上の）実際磁化であり、 $A$ はいわゆるデザインマトリクスであり、空間的なコイルプロフィールと、存在している $B_0$ マップおよび $B_1$ マップと、適用される $k$ 空間軌道とが含まれる連立複素一次方程式からなる。このようなデザインマトリクスは、たとえばW. Grisom他著「マルチコイルパラレル励起におけるRFパルスの設計のための空間ドメイン法」（Mag. Res. Med. 56, 620 - 629, 2006）に記載されている。 $b(t)$ は、たとえば $N$ 個の関数 $b_c(t)$ （各々の送信チャネル $c = 1$ から $N$ についての関数）を含むベクトルである。この方程式は、たとえばステップIIIIaで作成される。方程式（1）の解が見出されれば、結果として、存在するすべての送信チャネルについて振幅の関数が時間に関係して得られる。しかしながらこの方程式の作成も、さまざまな解法も当業者には周知であり、ここで詳細に説明する必要をみない。任意選択で、反復式の方法を適用した上で最適化された解法を行うこともでき、それはたとえば、ステップVIIIIで方程式を解くときに守られるべき周辺条件が変更されて、患者に対する高周波負荷の追加の最適化を実現することによって行われる。

【0084】

最適化ステップIIIIの最後には、ローフリップ領域について得られたマルチチャネルパルス列と、 $k$ 空間軌道とが存在している。そしてステップIVでマルチチャネルパルス列をアップスケーリングして、通常は $5^\circ$ のフリップ角範囲ではなく最大 $90^\circ$ のフリップ角にまで及ぶ、本来所望の目標磁化を得ることができる。このことは、個々のパルスの振幅を所望のスケール係数と単に掛け合わせることによって行われる。

【0085】

ステップVで、アップスケーリングの際に生じる可能性がある誤差が、部分的なブロッホシミュレーションによって補正される。このような部分的なブロッホシミュレーションは、パルス列内部のいくつかの時点だけで実行される。その際にはブロッホの方程式を適用した上で、チェックが行われるべき各時点についてのデータがシミュレータでブロッホの方程式を適用してチェックされ、そのようにして得られる磁化が算出される。そして目標磁化の設定との誤差を発見し、高周波パルス列の変更によって相応の小さな補正を行うことができる。

【0086】

次いでステップVIで、時間的に完全なブロッホシミュレーションにより、見出されたすべてのパラメータのチェックが再度行われる。その中では、これらのパラメータにより達成される磁化が実際に目標磁化に一致しているかどうかチェックされる。

【0087】

そして最後にステップVIIで、制御シーケンスASが中間保存または即座の実行のために引き渡される。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 8 8 】

図 3 には、 $k$  空間軌道  $k(t)$  が本発明による方式で決定されるステップ I I が、複数の部分ステップとして若干詳しく示されている。

## 【 0 0 8 9 】

まずステップ I I a には、ステップ I e で検出された目標磁化  $m$  の受取が示されている。図 4 は一例として、デカルト座標  $x, y$  を有する位置空間内の二次元スライス内部に、目標磁化としての文字  $pTX$  を含むパターンを示している ( $64 \times 64$  ピクセル  $220 \times 220$  mm)。

## 【 0 0 9 0 】

そしてステップ I I b で、エネルギー分布関数  $E(k)$  を得るために、この目標磁化がフーリエ変換により、好ましくは二次元の高速フーリエ変換により、二次元の  $k$  空間へ変換される。ただしフーリエ変換の前に、高周波のディテールをより良く検知するために、目標磁化  $m$  が平均値減算されている。平均値減算 (mean - exemption) によって、通常は非常に高いピークを有している  $k$  空間中心部のフェードアウトを実現できるからである。このような目標磁化  $m(r)$  からのエネルギー分布関数  $E(k)$  の決定は、数学的には次のように記述することができる。

## 【 0 0 9 1 】

## 【 数 2 】

$$E(k) = \left| \text{FT}(m(r) - m_{\text{mean}}) \right| = \left| \int (m(r) - m_{\text{mean}}) e^{-ikr} dr \right| \quad 20$$

## 【 0 0 9 2 】

ここで、 $r$  は位置空間内の位置、 $k$  は  $k$  空間内の位置、 $m_{\text{mean}}$  は位置空間内での目標磁化  $m(r)$  の平均値である。図 4 の目標磁化のこのようなフーリエ変換の結果が、図 5 に示されている。ここに図示されているのは、単位 [ $\text{mm}^{-1}$ ] でデカルト座標  $k_x, k_y$  を有する  $k$  空間内の二次元スライスである。

## 【 0 0 9 3 】

そしてステップ I I c で、エネルギー分布関数  $E(k)$  の本来の変更が行われる。そのために、まず第 1 のステップ I I c' で、 $k$  空間内のエネルギー分布関数  $E(k)$  の次元が縮小される。このことは図 5 に示す実施例では、 $k$  空間内の極座標  $k_r, k_\theta$  でのエネルギー分布関数の変換によって行われる。このような表示が図 6 に示されており、ここでは横軸に角度  $k_\theta$  が単位 [ $^\circ$ ] で示されており、縦軸に半径  $k_r$  が単位 [ $\text{mm}^{-1}$ ] で示されている。このとき図 6 の一番下の線が、図 5 の  $k$  空間中心部に対応している。そして、極座標  $k_r, k_\theta$  で表示されるエネルギー分布関数を 1 つの次元に縮小するために、ここでは半径  $k_r$  に縮小するために、極座標変換の後に、半径  $k_r$  に関して最大値投影が行われる。そのために角度  $k_\theta$  の方向で、図 6 に矢印で示すように、各々の半径  $k_r$  についてそれぞれ最大値が探索され、または、換言すると各々の半径  $k_r$  についての最大値が、図 6 に点で図示されている行に投影される。このことは、図 5 に示す点線に、これが矢印方向へ中心の回りに 1 回転したときに、半径  $k_r$  についての最大値を投影することに相当する。

## 【 0 0 9 4 】

その結果として、図 5 および図 6 に示す実施例では変更された「半径方向の」エネルギー分布関数  $E(k)$  が得られ、それが図 7 に示されている。ここでは各々の半径  $k_r$  (サンプリングポイント (サンプル) で表示されており、サンプリングポイント 2500 は値  $0.15 \text{ mm}^{-1}$  に相当する) について、それぞれエネルギー分布関数  $E(k)$  の最大値がプロットされている。エネルギー  $E$  は、最大値 1 に正規化された相対的なエネルギーである。この図では、半径  $k_r = 0$  のときにエネルギーが 0 である様子も明らかに示されており、その理由は、当初の目標磁化が平均値減算されていることによる。そうしなければ、ここにはエネルギー分布関数の内部の他のすべての構造から突出する非常に高いピークが

あり、そのために、これらの構造が何の効果も発揮できないことになる。

#### 【0095】

次のステップI I c ' 'で、この変更された半径方向のエネルギー分布関数  $E(k_r)$  が、個々の空間区域  $a$  つまりセグメントに区分される。図7に示す実施例では、この分割は半径  $k_r$  に関してのみ行われ、すなわち1つの次元で行われる。しかしながら原則として、エネルギー分布関数を2つまたは3つの座標でそれぞれ空間区域に区分し、ないしは二次元もしくは三次元のセグメントに区分することも可能であり、それはたとえば、それ以前に次元の縮小が行われていない場合である。

#### 【0096】

それ以前に次元の縮小が行われたかどうかに関わりなく、また、それが極座標であるか、デカルト座標であるか、あるいはその他の座標であるかに関わりなく、 $k$  空間内のエネルギー分布関数のこのようなセグメント化を行うことができるのが好ましい。このときセグメント化は、まずエネルギー分布関数の最大値が探索され、次いでエネルギー分布関数が分割されて、各々の空間区域  $a$  に1つの最大値を見出すことができるように実行されるのが特別に好ましい。図7では、これはエネルギー分布関数  $E(k_r)$  の最大値  $E_m$  である。このとき空間区域  $a$  の厳密な分割は、境界線（図7では垂直方向の点線で図示されている）が、それぞれ2つの最大値  $E_m$  の間で、エネルギー分布関数  $E(k_r)$  の最小値の個所に位置するように行われる。このセグメント化は、個々のセグメントをそれぞれ別様に重み付けするために行われる。このことは、低いエネルギー最大値があまりにも過小に表現されないように配慮するために実行される。すなわち通常、多くの方法において  $k$  空間内の高い周波数はどちらかという回避されるが、このことは、後の画像での分解能低下につながってしまう。エネルギー分布関数の個々の空間区域のそれぞれ異なる重み付けにより、エネルギーコストと良好な分解能との間で妥協点を見出すことができる。

#### 【0097】

このとき重み付けは、該当する空間区域  $a$  がそれぞれの間位置  $E_m$  を有している座標で、すなわち図7に示す実施例で具体的には半径  $k_r$  で、関数値  $E_m$  がスケーリング値と乗算され、それにより重み関数  $W$  の値に達するように行えるのが好ましい。この重み関数は、たとえばその最大値に関して同じく1に正規化されていてよい。このことは、エネルギー最大値から重み関数  $W$  へと上方を向く矢印で図7に示されている。そして、該当する空間区域  $a$  の内部のその他すべての関数値が、対応する最大値  $E_m$  と同じスケーリング係数でスケールされる。すなわち、該当する空間区域  $a$  の関数全体が、最大値  $E_m$  が重み関数  $W$  の値に達する程度まで引き上げられる。

#### 【0098】

重み関数としては、たとえばハニング窓関数、ガウス関数、ヘミング関数などを適用することができる。図8には好ましいハニング関数が示されており、ここでは重み係数  $G_F$  は相対的な単位（最大値1に正規化）で、 $k$  空間内での半径  $k_r$ （再びサンプリングポイント（サンプル）で表示。ここではサンプリングポイント0が値  $-0.15 \text{ mm}^{-1}$  に相当し、サンプリングポイント5000が値  $0.15 \text{ mm}^{-1}$  に相当する）に対して示されている。重み付けのために、図7の位置0から2500に適合させて、2500から5000の関数の右半分だけが利用される。

#### 【0099】

関数  $E(k_r)$  の個々の空間区域  $a$  はそれぞれ別様に引き上げられるので、それぞれの空間区域の間の境界のところで再度平滑化が必要であり、このことは、移動平均法またはその他のローパスフィルタによって行うことができる。各空間区域の間の境界は、関数  $E(k_r)$  の最小値のところで選択されているので、平滑化による関数の変更は、以後の軌道決定にさほど影響を与えない。エネルギー分布関数の最小値を有する個所では、のちに適切な最善の  $k$  空間軌道が、エネルギー分布関数の最大値の個所に比べてもともとそれほど稠密ではないからである。

#### 【0100】

図7と図8に示されたスケールリングの後、および平滑化の後、図7に示す半径方向のエ

10

20

30

40

50

エネルギー分布関数  $E(k_r)$  から、図 9 に示す変更されたエネルギー分布関数  $E'(k_r)$  が得られる。同じく、相対的なエネルギー  $E$  が最大値の値 1 に正規化されて、半径  $k_r$  に対してプロットされている（図 7 と同様のサンプリングポイントで表示）。ここに明瞭に見られるとおり、この重み付けされた半径方向のエネルギー分布関数  $E'(k_r)$  は、やはり図 7 の半径方向のエネルギー分布関数  $E(k_r)$  と同じ最大値  $E_m$  を有しているものの、若干適合化された高さを有しており、すなわち、半径が大きいときの最大値が、半径が小さいときの最大値と比べて高くなっている。

#### 【0101】

そして最後にステップ I I d で、こうして決定された変更されたエネルギー分布関数  $E'(k_r)$  に基づいて、適切な  $k$  空間軌道を決定することができ、それにより  $k$  空間軌道の密度は、エネルギーの高い領域でできるだけ高くなっており、エネルギー分布関数においてエネルギーが低い領域では、できるだけ低くなっている。

10

#### 【0102】

任意選択で、ステップ I I g において先ずエネルギー分布関数  $E'(k_r)$  に基づいて、特別に好適な軌道タイプ  $k_{TT}$  を自動的に決定しておくことができる。そしてステップ I I d での軌道の決定は、ステップ I I g で決定された軌道タイプについて行われる。あるいは別案として、この軌道タイプ  $k_{TT}$  をすでに本方法の開始時に、たとえば図 1 のステップ I f で、操作者により設定しておくこともできる。

#### 【0103】

図 10 は、 $k$  空間内の螺旋軌道の半径  $k_r$  が相対的な単位で最大値 1 に正規化されて、時間  $t$ （同じくサンプリングポイント（サンプル）で表示されており、サンプリングポイント 1400 はほぼ値 10 ms に相当する。1 の最大値は 9.7 で到達されているからである）に対して示されたグラフを示している。このグラフから見て取れるように、まず、600 サンプル以下の第 1 の領域には比較的ゆっくりとした上昇が存在しており、すなわち、この領域（0.4 以下の半径）では軌道の密度が比較的高い。そして 800 から 1000 サンプルの領域では、半径  $k_r$  がかなり著しく上昇する。これはアンダーサンプリングされた領域であり、それに応じてこの領域は、図 9 の 1200 から 1700 サンプルの間の最小値で補正されている。すなわち、特徴的な最小値がある領域はアンダーサンプリングされる。

20

#### 【0104】

任意選択で、最善の  $k$  空間軌道を見出すために、図 3 に破線の四角で図示している別の方法ステップを取り入れることもできる。

30

#### 【0105】

たとえばステップ I I e で、個々の送信チャネルないしアンテナについて現在の  $B_1$  マップを受け取ることができる。この  $B_1$  マップは、たとえばステップ I c でそれぞれ個々の送信チャネルについて決定されたものであってよい。そしてステップ I I f で、任意選択により、この  $B_1$  マップに基づいて、 $B_1$  強度が比較的低い  $k$  空間内の位置を決定することができる。そして、適当な  $k$  空間軌道タイプ  $k_{tt}$  に関して決定がなされるときに、このような位置を同じくステップ I I g で考慮に入れることができる。別の場合には、ステップ I I d で適当な  $k$  空間軌道を決定するためにこの情報を直接取り入れることもできる。さらに別の任意選択のステップは、励起の空間分解能に影響を及ぼす、ステップ I I h でのスケーリング係数の設定である。このとき、線形の体系的なエネルギー密度グラジエントの勾配が設定されて、たとえばエネルギー分布関数に追加の関数部分として加算され、それにより、たとえば高周波電力が高くなるというコストを払って、いっそう高い空間分解能が可能となる。

40

#### 【0106】

さらに任意選択で、ステップ I I i に示すように、 $k$  空間軌道に沿ったサンプリングポイントの密度を変更し、そのようにして本方法を迅速化するために、TX センス法を追加的に適用することができる。同様に、現在の  $B_0$  マップに基づいて、および場合によりこれに追加して目標磁化  $m$  に基づいて、 $k$  空間内でのエラー密度を決定し、これを現在の最

50

善の  $k$  空間軌道の計算時に同じく考慮に入れることも可能である。このことは、図 3 の任意選択のステップ I I j に示されている。

【 0 1 0 7 】

図 1 1 は左側で、図 1 0 の時間的なピッチ推移に対応する二次元の螺旋状の  $k$  空間軌道  $k(t)$  を示しており、これはデカルト  $k$  空間座標  $k_x$ 、 $k_y$  で、それぞれ  $\text{mm}^{-1}$  を単位として表したものである。これに対応して右側のグラフには、 $x$  座標  $k_x$  と、 $y$  座標  $k_y$  と、空間的な振幅  $k$  (単位  $\text{mm}^{-1}$ ) とについて、曲線形状が時間  $t$  (単位  $\text{ms}$ ) に対して示されている。この螺旋軌道  $k(t)$  が明らかに示すように、最初は  $k$  空間内で螺旋状の線の密度が比較的大きく、次いで外方に向かってまず減少していき、続いて終わりに向かって再び増加しており、このことは図 9 と図 1 0 でも設定されている。

10

【 0 1 0 8 】

比較のために図 1 2 には、均等なピッチをもつ従来の二次元の  $k$  空間軌道  $k_s(t)$  が示されている。図 1 3 はさらに別の比較として、図 1 2 に類似する二次元の  $k$  空間軌道  $k_w(t)$  を示しているが、 $k$  空間軌道  $k_w(t)$  の半径方向密度はあらかじめハニング窓で重み付けされており、すなわち、軌跡の密度は外方に向かって連続的に減っていく。それにより、目標磁化へのマッチングは行われていない。分解能を犠牲にしてエネルギーを節約するために、 $k$  空間の中心部では若干濃い密度で、外方に向かって若干減少するように試みられているにすぎない。

【 0 1 0 9 】

図 1 4 のグラフは、ブロッホシミュレーションで実現されたさまざまなパフォーマンスパラメータを比較のために示しており、これらの異なる測定は、適用される  $k$  空間軌道の種類によってそれぞれ区別される。目標磁化はどの測定でも図 4 の図面に準じている。最大の目標フリップ角は  $20^\circ$  に設定されている。オフ共振、すなわち  $B_0$  マップは考慮されていない。およそ  $10 \text{ ms}$  の長さで 15 回の螺旋周回をもつ二次元の螺旋軌道がそれぞれ適用されている。すなわち、ここでは軌道タイプが厳密に設定されており、システム自体によって最善の軌道タイプが決定されるのではない。考慮されているのは模型で撮影された  $B_1$  マップであり、常に同じ模型が使用されている。そして予め定められた投影に基づいて、たとえば *Settompop* 他著の上記論文に記載されているような、マグニチュード最小 2 乗目標関数を含む *Tik-Tok* 最適化法が利用される。このとき、たとえばチホノフ正規化のような正規化は適用されていない。50% 以下のさまざまな異なる加速関数で測定が行われている。

20

30

【 0 1 1 0 】

3 つすべてのグラフにおいて、曲線 A は、図 1 2 のような従来式の二次元の  $k$  空間軌道でシミュレーションされた曲線である。曲線 B は、図 1 3 に示すような、ハニング窓で重み付けされた従来式の二次元の  $k$  空間軌道  $k_w(t)$  に相当しており、曲線 C は、図 1 1 に示すような、本発明に基づいて決定された二次元の  $k$  空間軌道  $k(t)$  に相当している。図 1 4 の 3 つすべてのグラフにおいて、 $x$  軸には加速係数  $b$  がそれぞれ単位 % でプロットされている。ここで 50% とは、 $k$  空間軌道上の円の 50% が節約されたことを意味している。すなわち、ここには螺旋のアンダーサンプリングの百分率がプロットされている。

40

【 0 1 1 1 】

一番上のグラフは二乗平均平方根誤差 (Root-Mean-Square-Error; RMSE) を示しており、すなわち、励起誤差  $RMSE$  (無次元の値) を示している。特に 30% を超える大きな加速度のとき、励起誤差が著しく低くなるので、本発明による方法が従来の二次元の  $k$  空間軌道に比べて著しい利点を提供することが明瞭に表れている。中央のグラフは、HF パルスの最大のピーク電圧  $V_{peak}$  を示している (単位はボルト)。このとき本発明の方法により生成される二次元の  $k$  空間軌道のシミュレーション値は、従来式の変更されない  $k$  空間軌道よりも常に優れている。加速係数が特別に高いとき、本発明の方法はハニング窓での単純な重み付けよりも利点がある。

【 0 1 1 2 】

50

最後に一番下のグラフは、全体として投入される高周波電力  $RF_{pow}$  を示している（単位はワット）。これは投入される  $SAR$  を表す指標である。明らかにわかるとおり、加速度に関わりなく、本発明に基づいて決定された二次元の  $k$  空間軌道によるシミュレーションは、従来式の二次元の  $k$  空間螺旋軌道による方法や、これをもとに生成されるハニング窓で重み付けされた軌道による方法よりも常に優れており、ハニング窓で重み付けされた軌道のほうが従来式の軌道よりはまだ優れている。

#### 【0113】

図15は、螺旋軌道について上に説明した方法に関わる4つの画像を再度示しており、ここでは目標磁化  $m$  の別のパターンを前提としている。左の画像は、環状の円の形態の目標磁化パターンを、位置空間内の1つのスライスつまり  $x/y$  平面で示している。その右の画像は、これに対応する  $k$  空間内のエネルギー分布関数をデカルト  $k$  空間座標  $k_x, k_y$  で示している（これは、周波数もよく認識できるようにするためのハイコントラスト画像である）。左下の画像には、このエネルギー分布関数に基づいて決定された最善の二次元の螺旋状の  $k$  空間軌道  $kt$  が示されており、右下の画像は、ここでは黒色の背景に破線の白色で、ないし白色の背景に黒色で図示された、この螺旋状の  $k$  空間軌道とエネルギー分布関数との重ね合わせを示している。エネルギー密度が高い領域では、すなわち  $k$  空間内の白色の領域では、軌道の密度もそれに応じて高くなっており、それに対してエネルギー密度が低い領域では、 $k$  空間軌道の密度もそれに応じて減ることが明らかに示されている。

10

#### 【0114】

図16は、帯状の目標磁化パターンについての類似の画像を、位置空間内の  $x/y$  平面の1つのスライスで示している。フーリエ変換を用いた  $k$  空間内のエネルギー分布関数の算出にあたって、右上の画像に  $k$  空間内のパターンが得られる。このエネルギー分布関数で決定される二次元の  $EPI-k$  空間軌道が、左下のグラフに示されている。右下の画像には、最適化された  $k$  空間軌道と、右上のエネルギー分布関数の画像との重ね合わせが同じく示されている。この場合にも、 $k$  空間軌道線の最大の密度は、エネルギー分布関数も最大の値を有しているところ、すなわち  $k$  空間内のエネルギー密度が特別に高いところに見出せることが明らかである。

20

#### 【0115】

最後に図17は、図14の評価に準じてパフォーマンスパラメータ値を再度示しているが、ここでは、図16の左下に図示しているような  $EPI$  軌道について示している。シミュレーションの入力値は、それが41本の線をもつ  $EPI$  軌道であり、螺旋状の軌道ではないという点を除けば、図14のものと同一である。目標パターンも、図14と同様である。一番上のグラフには同じく二乗平均平方根誤差すなわち励起誤差が示されており、中央のグラフには最大のピーク電圧、下側のグラフには実際に印加される高周波電力が、それぞれ加速係数  $b$  に関係して単位%で示されている。ここで曲線Aは、従来から適用されているような距離が等間隔である従来式の  $EPI$  軌道による値を示している。曲線Cは、本発明の方式で1つの次元で密度に関して変更された  $k$  空間軌道を適用したときのシミュレーション値を示しており（図16の左下の画像に準ずる）、曲線Dは、本発明に基づいて密度が2つの次元で変更された  $EPI$  軌道のシミュレーション値を示している（すなわち、上に説明したような次元の縮小をしない）。明らかにわかるとおり、いずれのケースでも、本発明の方法によって従来式の軌道よりも優れたシミュレーション値が実現される。加速値が大きいときにのみ、2つの次元での密度の変更のほうが1つの次元だけの変更よりも優れている。したがって大半のケースでは、次元が縮小されるいっそう迅速な方式で十分である。

30

40

#### 【0116】

最後にもう一度だけ指摘しておく、上に詳細に説明した方法および構成は実施例であり、その基本原理は、特許請求の範囲により指定される限りにおいて、本発明の範囲を離れることなく広い範囲で当業者により変更することができる。念のため付言しておく、単数または複数の特定がなされていないものは、該当する構成要件が単数でもまたは複数

50

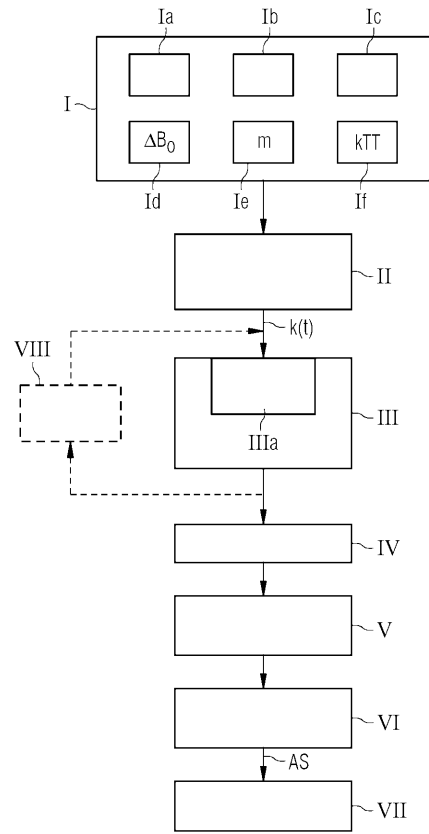
存在していてもよいことを表している。同様に「ユニット」という用語は、場合により空間的に分散している場合がある、複数のコンポーネントでそれが成り立っていることを排除するものではない。

【符号の説明】

【 0 1 1 7 】

1	磁気共鳴システム	
2	磁気共鳴スキャナ	
3	基本磁場磁石	
4	グラジエントシステム	
5	全身コイル	10
6	局所コイル	
7	寝台	
8	患者用トンネル	
1 0	制御装置	
1 1	グラジエント制御ユニット	
1 2	受信ユニット	
1 3	H F 受信ユニット	
1 4	再構成ユニット	
1 5	測定制御ユニット	
1 6	記憶装置	20
1 7	インターフェース	
2 0	端末装置	
2 2	制御シーケンス決定装置	
2 3	入力インターフェース	
2 4	エネルギー分布決定ユニット	
2 5	軌道決定ユニット	
2 6	H F パルス最適化ユニット	
2 7	制御シーケンス出力インターフェース	

【圖 2】



【圖 7】

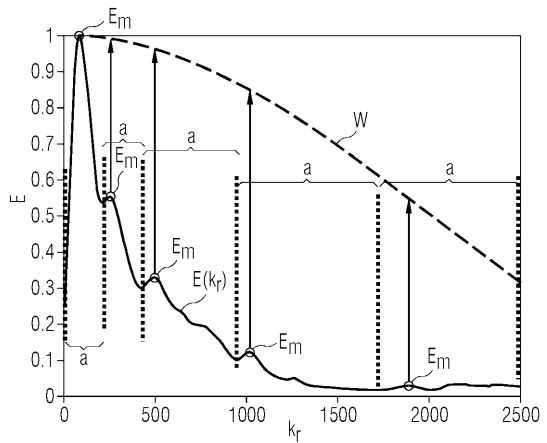
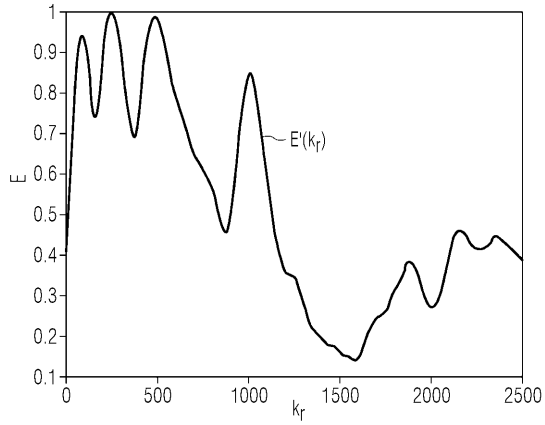


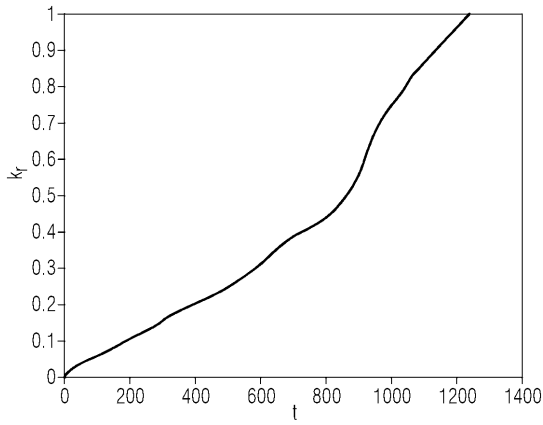
Figure 1 shows a plot of the normalized velocity autocorrelation function,  $c(t)$ , on the y-axis, against the wave vector,  $k_r$ , on the x-axis. The y-axis ranges from 0.2 to 0.65 with increments of 0.05. The x-axis ranges from 0 to 5000 with increments of 500. The curve is a smooth, symmetric, inverted parabola-like shape. It starts at  $c(t) = 0.2$  at  $k_r = 0$ , reaches a maximum of approximately 0.62 at  $k_r = 2500$ , and returns to  $c(t) = 0.2$  at  $k_r = 5000$ . A label 'W' with a wavy line points to the curve.



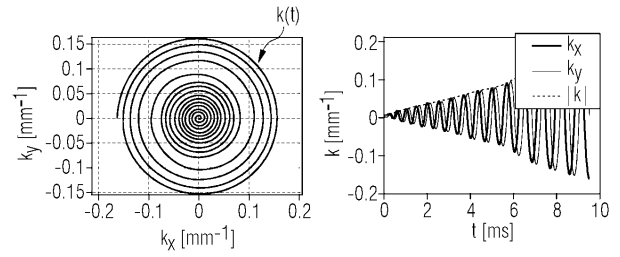
【図 9】



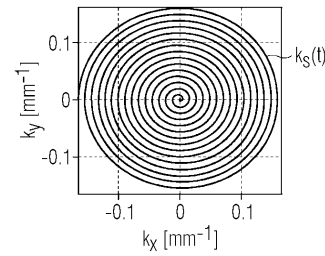
【図 10】



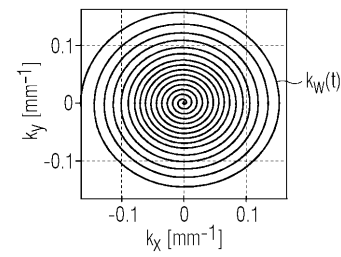
【図 11】



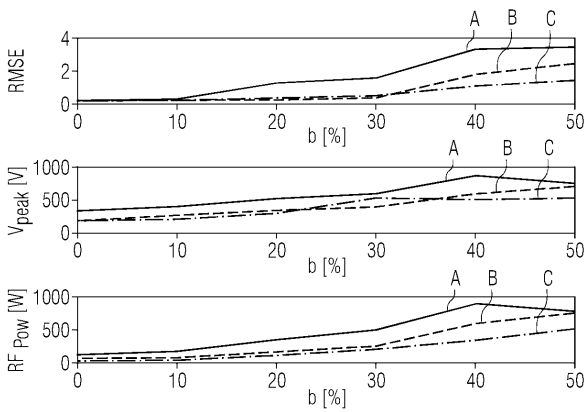
【図 12】



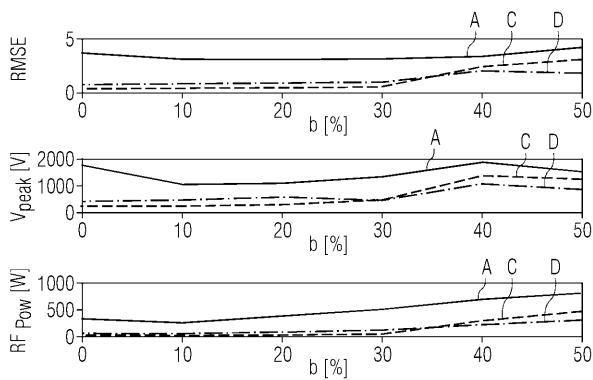
【図 13】



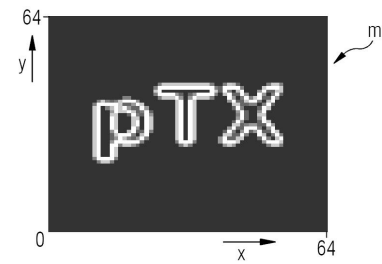
【図 14】



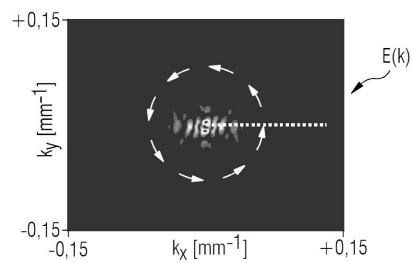
【図 17】



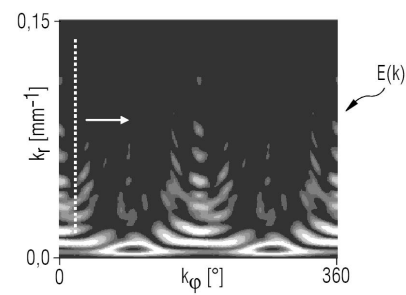
【図 4】



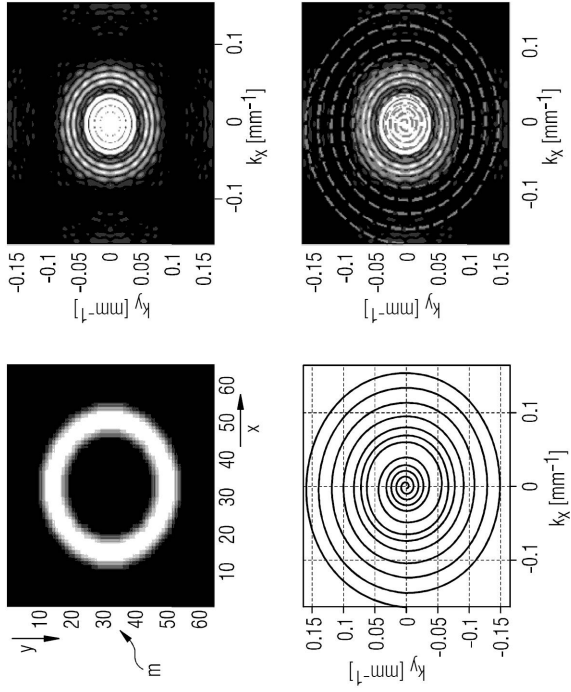
【図 5】



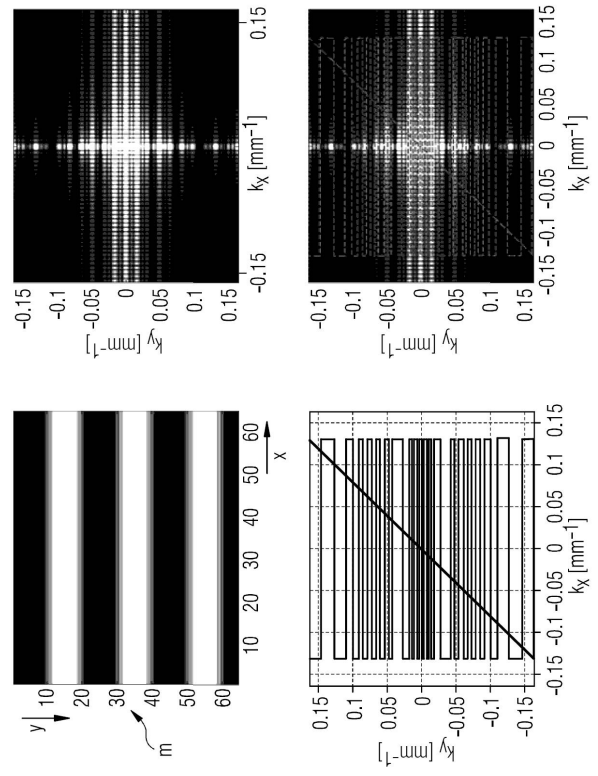
【図 6】



【図 15】



【図 16】



---

フロントページの続き

(72)発明者 ヨーゼフ ブフォイファー

ドイツ連邦共和国 9 1 3 5 8 クンロイト ヒンテレ プファッフェンライテ 1 7

(72)発明者 ライナー シュナイダー

ドイツ連邦共和国 9 1 3 1 5 ヘビシュタット ルーカス - クラナッハ - シュトラーセ 1 ア  
ー

審査官 右 高 孝幸

(56)参考文献 特開平11-244258 ( J P , A )

特開2009-165834 ( J P , A )

特開2010-358 ( J P , A )

国際公開第2010/113122 ( WO , A 1 )

国際公開第2010/113131 ( WO , A 1 )

米国特許出願公開第2009/0256570 ( U S , A 1 )

米国特許出願公開第2011/0241680 ( U S , A 1 )

K. Setsompop et al , Magnitude least squares optimization for parallel radio frequency  
excitation design demonstrated at 7 Tesla with eight channels , Magnetic Resonance in M  
edicine , 2 0 0 8 年 4 月 , vol.59, no.4, pp.908-915

(58)調査した分野(Int.Cl. , D B 名)

A 6 1 B 5 / 0 5 5