

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第6858018号
(P6858018)

(45) 発行日 令和3年4月14日 (2021.4.14)

(24) 登録日 令和3年3月25日 (2021.3.25)

(51) Int. Cl. F I
A 6 1 N 5/10 (2006.01) A 6 1 N 5/10 P

請求項の数 12 (全 18 頁)

(21) 出願番号	特願2016-575420 (P2016-575420)	(73) 特許権者	590000248
(86) (22) 出願日	平成27年6月25日 (2015.6.25)		コーニンクレッカ フィリップス エヌ ヴェ
(65) 公表番号	特表2017-520319 (P2017-520319A)		KONINKLIJKE PHILIPS N. V.
(43) 公表日	平成29年7月27日 (2017.7.27)		オランダ国 5656 アーヘー アイン ドーフエン ハイテック キャンパス 5 2
(86) 国際出願番号	PCT/EP2015/064328	(74) 代理人	110001690
(87) 国際公開番号	W02016/001046		特許業務法人M&Sパートナーズ
(87) 国際公開日	平成28年1月7日 (2016.1.7)	(72) 発明者	イゾラ アルフォンソ アガティノ
審査請求日	平成30年6月20日 (2018.6.20)		オランダ国 5656 アーヘー アイン ドーフエン ハイ テック キャンパス 5
審査番号	不服2019-7076 (P2019-7076/J1)		
審査請求日	令和1年5月30日 (2019.5.30)		
(31) 優先権主張番号	14174905.1		
(32) 優先日	平成26年6月30日 (2014.6.30)		
(33) 優先権主張国・地域又は機関	欧州特許庁 (EP)		
早期審査対象出願		最終頁に続く	

(54) 【発明の名称】 放射線治療計画システム及び方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

フルエンスプロファイルに対応する放射線治療計画ソリューションを決定するための放射線治療計画システムであって、当該放射線治療計画システムは、

1つ以上の線量の品質指標に基づいて、1つ以上の自動計画の放射線治療計画を自動的に生成するための自動計画生成ユニットと、

所定の複数の重みを前記1つ以上の線量の品質指標に配分する重み分布ユニットであって、前記重みは、前記品質指標の重要度を示すものである、重み分布ユニットと、

前記複数の重みから選択された重みを調整する重み調整ユニットと、

調整された前記重みに応答して、前記1つ以上の自動計画の放射線治療計画を用いて、フルエンスプロファイルに対応するようにパレットフロントに基づいて前記放射線治療計画ソリューションを生成するソリューション生成ユニットと、を備え、

前記放射線治療計画システムは前記放射線治療計画ソリューションを臨床目的と比較し、前記放射線治療計画システムはさらに、前記放射線治療計画ソリューションが前記臨床目的を満たしているか否かを示す比較信号を生成し、前記重みの調整が行われて最適化された前記放射線治療計画ソリューションが前記臨床目的を満たすことを前記比較信号が示す場合には、前記放射線治療計画システムは、前記放射線治療計画ソリューションを放射線治療システムへと送達し、前記重みの調整が行われて最適化された前記放射線治療計画ソリューションが前記臨床目的を満たしていないことを前記比較信号が示す場合には、最終の自動生成計画を生成するために、ウォームスタートとして前記放射線治療計画ソリュ

10

20

ーションを提供する、放射線治療計画システム。

【請求項 2】

前記重み調整ユニットは、グラフィカルユーザインタフェースを含み、前記グラフィカルユーザインタフェースは、前記複数の重みのそれぞれを調整するためのスライダを備える、請求項 1 に記載の放射線治療計画システム。

【請求項 3】

前記スライダを使用したユーザとの対話の受信に応じて、前記放射線治療計画システムは、調整された前記重みに基づいて、パレート解の空間内で線形計画問題を最適化する、請求項 2 に記載の放射線治療計画システム。

【請求項 4】

前記グラフィカルユーザインタフェースはさらに、前記スライダのそれぞれに対応する線量マップ及び線量容積ヒストグラムを更新し、表示する、請求項 2 に記載の放射線治療計画システム。

【請求項 5】

前記放射線治療計画システムは、前記ソリューション生成ユニットが前記放射線治療計画ソリューションをパレートフロントに基づいて精緻化する、請求項 1 に記載の放射線治療計画システム。

【請求項 6】

前記放射線治療計画システムは、前記ソリューション生成ユニットにおけるパレートフロントのサンプリングをする一連の放射線治療計画を決定する、請求項 1 に記載の放射線治療計画システム。

【請求項 7】

前記放射線治療計画システムは、各線量の前記品質指標を個別に最適化することによって、N アンカーの放射線治療計画を決定し、N は線量の品質指標の数に対応し、前記放射線治療計画システムは、さらに、各線量の前記品質指標に対し同じ重みを使用することによって、1 つの追加のバランス治療計画を決定し、

前記ソリューション生成ユニットは、前記 N アンカーの放射線治療計画及び前記 1 つの追加のバランス治療計画を用いて、前記放射線治療計画ソリューションを生成する、請求項 1 に記載の放射線治療計画システム。

【請求項 8】

前記ソリューション生成ユニットは、前記 1 つ以上の自動計画の放射線治療計画の凸線形結合を生成することによって、近似されたパレートフロントを構築する、請求項 1 に記載の放射線治療計画システム。

【請求項 9】

前記ソリューション生成ユニットは、前記 1 つ以上の線量の品質指標のそれぞれを正規化する、請求項 1 に記載の放射線治療計画システム。

【請求項 10】

フルエンスプロファイルに対応する放射線治療計画ソリューションを決定するための放射線治療計画システムの作動方法であって、

前記放射線治療計画システムの自動計画生成ユニットが、1 つ以上の線量の品質指標に基づいて、1 つ以上の自動計画の放射線治療計画を生成するステップと、

前記放射線治療計画システムの重み分布ユニットが、所定の複数の重みを前記 1 つ以上の線量の品質指標に配分するステップであって、前記重みは、前記品質指標の重要度を示すものである、ステップと、

前記放射線治療計画システムの重み調整ユニットが、前記複数の重みから選択された重みを調整する操作を受け付けるステップと、

前記放射線治療計画システムのソリューション生成ユニットが、調整された前記重みに応答して、前記 1 つ以上の自動計画の放射線治療計画を用いて、前記フルエンスプロファイルに対応するようにパレートフロントに基づいて前記放射線治療計画ソリューションを生成するステップと、

10

20

30

40

50

前記放射線治療計画システムの評価ユニットが、前記放射線治療計画ソリューションを臨床目的と比較するステップと、

前記評価ユニットが、前記放射線治療計画ソリューションが前記臨床目的を満たしているか否かを示す比較信号を生成するステップであって、前記重みの調整が行われて最適化された前記放射線治療計画ソリューションが前記臨床目的を満たすことを前記比較信号が示す場合には、前記放射線治療計画ソリューションを放射線治療システムへと送達し、前記重みの調整が行われて最適化された前記放射線治療計画ソリューションが前記臨床目的を満たしていないことを前記比較信号が示す場合には、最終の自動生成計画を生成するために、ウォームスタートとして前記放射線治療計画ソリューションを提供するステップと、を含む、放射線治療計画システムの作動方法。

10

【請求項 1 1】

1 つ以上のコンピュータで実行可能なコンピュータプログラムが記憶されたコンピュータ可読記憶媒体であって、前記コンピュータプログラムは、請求項 1 に記載の放射線治療計画システムのコンピューティングシステムのプロセッサによって実行されると、前記プロセッサに、請求項 1 0 に記載の放射線治療計画システムの作動方法のステップを実行させる、コンピュータ可読記憶媒体。

【請求項 1 2】

1 つ以上のコンピュータで実行可能なコンピュータプログラムであって、請求項 1 に記載の放射線治療計画システムのコンピューティングシステムのプロセッサによって実行されると、前記プロセッサに、請求項 1 0 に記載の放射線治療計画システムの作動方法のステップを実行させる、コンピュータプログラム。

20

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0 0 0 1】

本発明は、フルエンスプロファイル (fluence profile) によって放射線治療計画ソリューションを決定するための放射線治療計画システム、放射線治療計画方法及びコンピュータ可読記憶媒体に関する。

【背景技術】

【0 0 0 2】

放射線治療計画 (RTP) の主な目的は、すべての臨床目的を可能な限り満たすことができる迅速で正確な最良の線量分布 (すなわち、フルエンスビームプロファイル) を決定することである。例えば、特定の線量は、できる限り近くの危険臓器 (OAR) には送達せずに腫瘍に送達されねばならない。したがって、放射線治療 (RT) の逆方向計画における最適化の問題は、腫瘍標的及び近傍の重要組織構造に対して多数の計画目的を伴うため、本質的に多基準の問題である。臨床の決定は臨床願望を満たすと思われるまで、一般的に、これらの対立する目的のうち、重要な重みの割り当てに基づいて、全体的に必要とされる。臨床願望を満たすと、多くの繰り返しの最適化を典型的に伴う。近年、例えば Philips Pinnacle³ 治療計画システム (TPS) のような治療計画システムにおいては、「自動計画」ルーチンは臨床的要件を満たすことが可能な計画を自動的に生成するために含まれており、本明細書に参考として組み込まれている。R. Kashani による「MO-D-BRB-07: Automated IMRT Plan Generation for Prostate Cancer」、Med. Phys. (2010), Vol. 37, pp. 3340-3340 を参照。これらの自動計画ルーチンの実行は「スクリプト」に依存し、テキストファイルとして記憶されている内部コマンドの集合体である。スクリプトは新しい患者ファイル上でいつでも呼び出されることが可能である。

30

40

【0 0 0 3】

US 2013197878 A1 は、放射線治療の最適化のためのフルエンス及びビーム方向の最適化パッケージを開示し、これは PARETO (パレートアウェア放射線治療進化治療最適化) と呼ばれ、いくつかの目的関数を同時に最適化することが可能な多目的遺

50

伝的アルゴリズムを利用し、そのトレードオフ表面の構造を効率的かつ詳細にマッピングする。PARETOは、パレート非優越解のデータベースを生成し、IMRT治療計画における多数の計画目標間のトレードオフのグラフィック探索を可能にする。PARETOは、自動多目的治療計画の最適化を提供し、任意の目標の重みが選択される必要はなく、したがって、トレードオフ面を定義する最適解の大標本を求め、可能な妥協範囲を表す。

【0004】

新しい患者が呼び出されると、自動計画ルーチンは通常、様々な標的及び正常組織の計画構造を作成し、ビーム及び線量処方を設定し、カスタマイズされた強度変調放射線治療(IMRT)の目標をロードして最適化を開始する。標的とする目標は処方線量に基づき、一方、危険臓器の目標は標的及び危険臓器の幾何学的特性を考慮し、以前の事例に基づいて平均の線量を予測するモデルから決定される。不都合なことには、必要とされる時間と自動計画の最適化を達成する品質とは別の問題である。まれに第1の自動計画ソリューションはそれ以上の相互作用なく臨床的に承認される。むしろできるだけ多くの臨床目的に合致するために、より頻繁に追加で手動パラメータを微調整することが必要である。このパラメータを手動で微調整する追加の精緻化のステップは数時間かかり、それによって放射線治療計画のワークフローにおける自動計画の効果を弱める。

【0005】

M. Zarepishehらによる「A DVH-guided IMRT optimization algorithm for automatic treatment planning and adaptive radiotherapy replanning」、Medical Physics, vol. 41, no. 6, page 061711 (2014)の論文は、異なる標的/臓器のうち、及び臓器のDVH曲線の異なる部分のうち、臨床医が承認した線量容積のトレードオフに関する情報を含む基準計画のDVH曲線によって導かれた、自動的に治療計画を作成するアルゴリズムを開示する。ARTにおいては、基準計画は同一の患者に対する最初の計画であり、一方、自動治療計画に対して基準計画は類似の病状とジオメトリとを有する以前に治療した患者の臨床で承認され、送達された計画のライブラリから選択される。提案されたアルゴリズムはボクセルベースの最適化モデルを採用し、大ボクセルベースのパレート表面を誘導する。ボクセルの重みは、DVHの点で基準計画に類似する計画に近づくように繰り返し調整される。基準計画は実行可能であるが、パレート最適ではない場合には、アルゴリズムは基準計画よりも良いDVHを有するパレート最適計画を生成する。基準計画がジオメトリに対して制限し過ぎる場合には、アルゴリズムは基準計画に近いDVHを有するパレート計画を生成する。どちらの場合も新しい計画は基準計画と類似のDVHのトレードオフを有する。

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

本発明は、迅速かつ正確なやり方でフルエンスプロファイルに対応するソリューションを決定する、改善された放射線治療計画システム及び方法を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0007】

本発明の第1の態様によると、フルエンスプロファイルに対応するソリューションを決定するための放射線治療計画システムが提供され、放射線治療計画システムは、1つ以上の線量の品質指標に基づいて、1つ以上の自動計画の治療計画を自動的に生成するための自動計画ソリューション生成ユニットと、所定の複数の重みを1つ以上の線量の品質指標に配分するように構成された重み分布ユニットと、複数の重みから選択された重みを調整するように構成された重み調整ユニットと、調整され、選択された重みに応答して、フルエンスプロファイルに対応するソリューションを生成するように構成されたパレートフロンティアナビゲーションユニット(Pareto frontier navigation unit)と、を備える。放射線治療計画システムはソリューションを臨床目的と

比較し、放射線治療計画システムはさらに、ソリューションが臨床目的を満たしているか否かを示す比較信号を生成するように構成される。

【0008】

本明細書においては、例えばD. Craft及びC. Richterによる「Deliverable navigation for multicriteria step and shoot IMRT treatment planning」、Phys. Med. Biol. (2013), Vol. 58, pp. 87-103の論文において記載されているように、パレートフロンティアのナビゲータを使用することが提案され、これは参照によって本明細書に組み込まれ、一連の様々な自動計画ソリューションから最良の計画を選択する。

10

【0009】

多基準の最適化理論では、いくつかの手法がいくつかの（対立する）目標間の最良のトレードオフを見つけるために提案されてきた。最も一般的なものは、いわゆる「重み付け方法」（又は「スカラー化手法」）であり、すべての目標のうち重み付けされた合計からなる複合機能が最小化される。ここで決定者は、好適なソリューションをもたらすことが可能な最良の重みの集合を見つけることが求められる。この手法は、一般的に従来のIMRTフルエンスマップの最適化で使用される。多基準の最適化のための別の方法は、「目的計画法」の方法である。ここで決定者は、各オブジェクトに対する所望の値を既に知っている。次に、最小二乗問題は最良のソリューションを求めるために最小化され、これは所望の値の本参照ベクトルからの距離を最小化する。その他の手法はまた「辞書式順序」の最適化等のように入手可能である。

20

【0010】

多基準最適化手法の別の群は、いわゆる「対話型方法」を含む。対話型の方法においては、決定者は重要な役割をし、その考案は最も好ましいソリューションを探索するうえで決定者を支援する。対話型の方法においては、対話型のソリューションアルゴリズムのステップは繰り返され決定者は最も好ましいソリューションが求められるように好適な情報を断続的に提供する。本発明のパレートフロンティアのナビゲータはこの方法の最後の群の一部である。パレートナビゲータは当業者に知られており、例えばD. L. Craftらによる「Approximating convex Pareto surface in multiobjective radiotherapy planning」、Med. Phys. (2006), 33(9) pp. 3399-3407及び、D. Craftらによる「Simultaneous navigation of multiple Pareto surfaces, with an application to multicriteria IMRT planning with multiple beam angle configurations」、Med. Phys. (2010), 37(2) pp. 736-741の論文に記載されている。

30

【0011】

ここで、簡単に対話型のグラフィカルユーザインタフェース（GUI）がプランナ（planner）に提供され、自動計画ソリューションの凸結合間を「ナビゲート」する。この提案されたパレート計画ナビゲーションは、さらに任意の精緻化プロセスとして考えられることができ、自動生成されたソリューションが十分にプランナの要件を満たさない場合において、最良の計画を求めるために適用されることができる。一連の自動生成された計画を局所移動するこのようなナビゲーションツールは、プランナの決定プロセスを場合により簡略化し、複雑な臨床例の計画時間全体を数時間から数分に減少することができる。「局所移動」という表現は、限定された範囲（すなわち、局所）内のみで下記のステップ0で取得された、様々な可能性のあるソリューションを示す。

40

【0012】

好ましくは下記のステップ0で、第1の「自動生成された」ソリューションが、例えばPinnacle 3の自動計画ツールを使用することにより作成される。次にプランナは

50

、本ソリューション（すなわち、ビームフルエンスプロファイル）を受け取り、送達又は精緻化の何れかを行う。

【 0 0 1 3 】

精緻化が必要な場合、次に、本発明は精緻化のステップをより容易に、かつより迅速に行うために使用されることができる。

【 0 0 1 4 】

実際ステップ 1 では、パレートフロントは後述のように、 $N + 1$ の計画を最適化することによって近似することが好ましい。ステップ 0 で作成される第 1 のソリューションを「精緻化する」ことが望まれるため、パレート行列 Y は、 $(N + 1) + 1 = N + 2$ の計画（すなわち、 N 「アンカー」計画、「バランス」計画に加え、ステップ（0）での初期の自動生成された計画）が含まれる。

【 0 0 1 5 】

ナビゲーションの開始時には、パレート解の空間内を移動するために開始する初期位置は、ステップ 0 で取得されたソリューションに対応する。ユーザは、スライダを移動して、自分の要件により合致する新しい局所パレート解に向かってさらに移動することが可能である。

【 0 0 1 6 】

好ましくは、放射線治療計画システムは、1 つ以上の自動計画の治療計画のうち少なくとも 1 つが臨床目的を満たしているか否かを決定するための、自動生成されたソリューション評価ユニットをさらに備える。好ましくは、放射線治療計画システムは、パレートフロンティアナビゲータを使用するように構成される。パレートフロンティアナビゲータを使用することで、放射線治療計画システムは、限定された一連の自動計画ソリューションの局所的近傍内で最良の最終計画を求める。好ましくは、パレート行列を決定した後、プランナがパレート最適空間内でナビゲートすることを可能にするツールが提供される。プランナがパレート最適空間内でナビゲートすることを可能にするツールを提供することにより、放射線治療計画システムは、すべての標的と OAR の線量目標との間で最良のトレードオフを求める。好ましくは、ソリューションが臨床目的を満たしていないことを比較信号が示す場合には、放射線治療計画システムは、さらに、最終の自動生成された計画を生成するために、ウォームスタートとしてソリューションを提供するように構成される。

【 0 0 1 7 】

好ましい実施形態によれば、パレートフロンティアナビゲーションユニットは、パレートフロントの凸包の区分線形の近似を決定するように構成される。特に、提案されたナビゲータは、M. Monz らによる「Pareto navigation-algorithmic foundation of interactive multi-criteria IMRT planning」、Phys. Med. Biol. (2008), Vol. 53, pp. 985 - 998 の論文に記載されるような、パレートフロントの凸包の区分線形の近似 Y^c 内を移動し、本明細書に参照として組み込まれていることが好ましい。

【 数 1 】

$$Y^c = \left\{ \sum_{k=1}^{N+2} v_k f(x_k) \mid \sum_{k=1}^{N+2} v_k = 1, v \geq 0 \right\}$$

【 0 0 1 8 】

ここで v は、それぞれのナビゲーション解 Y^c に対する凸結合重みベクトルであり、 x_k は、 $k = 1, \dots, N + 2$ を有する自動生成された計画を意味し、 f はベクトル値関数であり、ここで、各コンポーネントは、線量の品質指標 N のうちの 1 つである。

【 0 0 1 9 】

さらに好ましい実施形態によれば、重み調整ユニットはグラフィカルユーザインタフェ

ースを含み、ここで、複数の重みからのそれぞれの重みには、スライダがそれぞれの重みを調整するために提供される。複数の重みからそれぞれの重みに対し、調整スライダを備えるグラフィカルユーザインタフェースを提供することによって、ユーザは簡単に対話型のツールを提供され、所与の治療計画のパラメータを調節する。

【0020】

さらに好ましい実施形態によれば、スライダを使用したユーザとの対話の受信に応答中、放射線治療計画システムは、調整された重みに基づいて、内側の線形計画問題を最適化するように構成される。記載したやり方でのユーザとの対話に応答して、（すなわち、調整された重みに基づいて内側の線形計画問題を最適化して）、好ましい実施形態は、新しい/既存のスライダ位置に適合するパレート解の次の最良の凸結合に向かって移動する。

10

【0021】

さらに好ましい実施形態によれば、グラフィカルユーザインタフェースはさらに、それぞれの線量マップ及び線量容積ヒストグラムを更新し、表示するように構成される。それぞれの線量マップ及び線量容積ヒストグラムを更新し、表示することによって、好ましい実施形態は、ユーザの選択結果についてプランナに迅速にフィードバックを提供する。

【0022】

前述したように、放射線治療計画システムはソリューションを臨床目的と比較するように構成され、放射線治療計画システムはさらに、ソリューションが臨床目的を満たしているか否かを示す比較信号を生成するように構成される。ソリューションを臨床目的と比較することによって、本発明による放射線治療計画システムは、既存のソリューションは、繰り返しの計画手順が停止されるように、満足のいく治療計画を既に提供しているか否かを決定するうえで支援し得る。さらに、ソリューションが臨床目的を満たしているか否かを示す比較信号を生成することにより、本発明による放射線治療計画システムは、ユーザが継続するか否かの問い合わせに応じて決定することを可能にする。代替として又は付加的に、一旦、満足のいくソリューション（すなわち、1つ以上の臨床目的を満たすソリューション）が見つかり、ユーザは基本設定を設定し治療計画手順を自動的に停止し得る。

20

【0023】

さらに好ましい実施形態によれば、ソリューションが臨床目的を満たすことを比較信号が示す場合には、放射線治療計画システムはさらに、ソリューションを放射線治療システムへと送達するように構成される。現在のソリューションが1つ以上の臨床目的を満たす場合には、十分なソリューションが見つかったため、繰り返しの治療計画手順が停止される。放射線治療は次に、直後又は一定の期間の後に開始する。いずれにしても治療計画を使用する準備をするために、放射線治療システムに決定されたソリューションを送信することが好ましい。

30

【0024】

さらに好ましい実施形態によれば、放射線治療計画システムは、パレートフロントに基づいた精緻化技術を採用するように構成される。パレートフロントに基づいた精緻化技術を採用することにより、好ましい実施形態による放射線治療計画システムは追加で長くかかる手動パラメータの微調整をせずに、自動生成されたソリューションを精緻化する。それによって、好ましい実施形態による放射線治療計画システムは、自動生成された計画の精緻化プロセスに対してプランナの制御性を高める。

40

【0025】

さらに好ましい実施形態によれば、放射線治療計画システムはパレートフロンティアのサンプリングをする一連の治療計画を決定するように構成される。パレートフロンティアをサンプリングする一連の治療計画を決定することによって、様々な治療の選択肢を迅速に、かつ対話型でブラウジングすることが可能である。

【0026】

さらに好ましい実施形態によれば、放射線治療計画システムは、一連の $N + 2$ の治療計画を決定するように構成され、 N は線量の品質指標の数に対応し、放射線治療計画システ

50

ムは、各線量の品質指標を個別に最適化することによって、Nアンカーの治療計画を決定するように構成され、放射線治療計画システムは、さらに、各線量の品質指標に対し類似の重みを使用することによって、1つの追加のバランス治療計画を決定するように構成される。自動計画設定のスライダ位置の異なる組み合わせを使用して、自動計画を介して一連の計画を初期に生成することにより、リアルタイムの対話型パレートナビゲータは、複雑な臨床シナリオにおける自動生成された計画の精緻化プロセスに対してプランナの制御性を高めるために配置されることができる。

【0027】

さらに好ましい実施形態によれば、放射線治療計画システムは、1つ以上の自動計画の治療計画の凸線形結合を生成することによって、近似されたパレートのフロントを構築するために構成される。1つ以上の自動計画の治療計画の凸線形結合を生成することにより、好ましい実施形態による放射線治療計画システムは、次のソリューションの検索（つまり、パレートナビゲーション）が、自動計画ソリューションの局所的近傍に限定されることを達成する。

【0028】

さらに好ましい実施形態によれば、放射線治療計画システムは、1つ以上の線量の品質指標のそれぞれを正規化するように構成される。

【0029】

本発明の第2の態様によると、フルエンスプロファイルに対応するソリューションを決定するための放射線治療計画方法が提供され、放射線治療計画方法は、1つ以上の線量の品質指標に基づいて、1つ以上の自動計画の治療計画を生成するステップと、所定の複数の重みを1つ以上の線量の品質指標に配分するステップと、複数の重みから選択された重みを調整するステップと、調整され、選択された重みに応答して、フルエンスプロファイルに対応するソリューションを生成するステップと、ソリューションを臨床目的と比較するステップと、ソリューションが臨床目的を満たしているか否かを示す比較信号を生成するステップと、を含む。

【0030】

本発明の第3の態様によると、1つ以上のコンピュータで実行可能な命令で符号化されたコンピュータ可読記憶媒体が提供され、コンピューティングシステムのプロセッサによって実行されると、プロセッサに、1つ以上の線量の品質指標に基づいて、1つ以上の自動計画の放射線治療計画を生成させ、所定の複数の重みを1つ以上の線量の品質指標に配分させ、複数の重みから選択された重みを調整させ、調整され、選択された重みに応答して、フルエンスプロファイルに対応するソリューションを生成させ、ソリューションを臨床目的と比較させ、ソリューションが臨床目的を満たしているか否かを示す比較信号を生成させる。

【0031】

請求項1に記載の放射線治療計画システム、請求項12に記載の放射線治療計画の方法、及び請求項13に記載のコンピュータ可読記憶媒体は、類似及び/又は同一の好ましい実施形態、特に従属クレームに記載された実施形態を有すると理解されるであろう。

【0032】

本発明の好ましい実施形態もまた、従属クレーム又はそれぞれ独立クレームを有する上記の実施形態の任意の組み合わせであり得ると理解されるであろう。

【0033】

これら及びその他の本発明の態様は、以下に記載された実施形態から明白であり、説明される。

【図面の簡単な説明】

【0034】

【図1】放射線治療計画システムの模式的及び例示的な実施形態を示す。

【図2】放射線治療計画方法の模式的及び例示的な別の実施形態を示す。

【図3】3次元パレート表面の模式的及び例示的な図を示す。

10

20

30

40

50

【図4】自動計画ツールの模式的及び例示的なスクリーンショットを示す。

【図5】パレットナビゲータツールの模式的及び例示的なスクリーンショットを示す。

【図6】パレットナビゲータツールのスライダ移動の模式的及び例示的な図を示す。

【発明を実施するための形態】

【0035】

図1は、フルエンスプロファイルに対応するソリューション101を決定する放射線治療計画システム100の模式的及び例示的な実施形態を示す。放射線治療計画システム100は、1つ以上の線量の品質指標112に基づいて、1つ以上の自動計画の治療計画111を自動的に生成するための自動計画ソリューション生成ユニット110と、所定の複数の重み121を1つ以上の線量の品質指標112に配分するように構成された重み分布ユニット120と、複数の重み121から選択された重み121aを調整するように構成された重み調整ユニット130と、調整され、選択された重み121aに応答して、フルエンスプロファイルに対応するソリューション101を生成するように構成されたパレットフロンティアナビゲーションユニット140と、を備える。

【0036】

図2は、フルエンスプロファイルに対応するソリューション101を決定する放射線治療計画方法200の模式的及び例示的な別の実施形態を示す。放射線治療計画方法200は、1つ以上の線量の品質指標112に基づいて、1つ以上の自動計画111の治療計画を生成する（ステップ210）と、所定の複数の重み121を1つ以上の線量の品質指標112に配分する（ステップ220）と、複数の重み121から選択された重み121aを調整する（ステップ230）と、調整され、選択された重み121aに応答して、フルエンスプロファイルに対応するソリューション101を生成する（ステップ240）と、を含む。

【0037】

図3は、例えばD. Craft及びC. Richterによる「Deliverable navigation for multicriteria step and shoot IMRT treatment planning」、Phys. Med. Biol. (2013), Vol. 58, pp. 87-103の論文において記載されているように、3次元パレット表面の模式的及び例示的な図の300を示す。自動生成された治療計画は、太字の黒い点で示されている。これらの自動生成された治療計画の凸結合は、それぞれの3つのソリューションポイントによって形成される三角形に対応する。自動生成されたソリューションの前述の凸結合は、3次元のパレット表面に近似する。さらに詳細は、Craft及びRichterによる前述の論文に記載されている。

【0038】

自動計画ソリューションの生成

第0のステップでは、例えば、R. Kashaniらの「MO-D-BRB-07: Automated IMRT Plan Generation for Prostate Cancer」、Med. Phys. (2010), Vol. 37, pp. 3340-3340の論文にて記載されるように、自動計画Pinnacle³ツールを使用することによって可能性のあるソリューション（例えばフルエンスビームプロファイル集合など）が決定され、これは本明細書に参照として組み込まれている。自動生成されたソリューションが既にすべての臨床願望を満たす場合には、次にその計画は速やかに送達されることが可能である。しかし別の原因により、新しい線量分布が十分に正確でない場合には、自動生成されたソリューションを精緻化するために追加で長くかかる手動パラメータの微調整が必要とされる。

【0039】

「自動計画」のルーチンは、Philips Pinnacle³治療計画システムにおいて入手可能である。図4は、例えば、Philips Pinnacle³治療計画システムを有する、使用される自動計画ツールの模式的及び例示的なスクリーンショット

400を示す。標的の最適化の目的はパネル420に示されている。OARの最適化の目的はパネル430に示されている。自動計画ルーチンは、本明細書でPinnacleの「スクリプト」と称される機械で読み取り可能な命令に依存する。Pinnacleのスクリプトは、内部コマンドのアセンブリに対応する。好ましくは、スクリプトは新しい患者ファイルにいつでも呼び出されることが可能である。新しい患者が呼び出されたとき、自動計画ルーチンは、様々な標的及び正常組織の計画構造を作成し、ビーム及び線量処方を設定し、カスタマイズされた強度変調放射線治療の目標をロードして最適化を開始する。標的とする目標は、通常、所与の処方線量に基づき、一方、危険臓器の目標は、標的及び危険臓器の幾何学的特性を考慮し、以前の事例に基づいて平均の線量を予測するモデルから決定される。危険臓器温存のモデルを不定期に過度に強調するために、自動計画ソリューションは最適化中により頻繁に仲介が必要となる可能性もある。これらの場合においては、プランナは、上述のR. Kashaniらによる「MO-D-BRB-07: Automated IMRT Plan Generation for Prostate Cancer」、Med. Phys. (2010), Vol. 37, pp. 3340-3340の論文において説明されたように、「標的/危険臓器のバランス」、「線量の減少」、「コンホーマリティ/減少したMU変調」等のような、異なる線量の品質指標に関連するN「精緻化」スライダ（例えば、 $N=3$ ）410a、410b、410cを微調整するよう求められる。その後、スクリプトは、この新しい自動計画パラメータ集合を呼び出して、プランナの要件に合致する新しい自動計画ソリューションを決定する。この繰り返しの手動の精緻化プロセスは非常に長くなり、リアルタイムの対話型ではない。いくつかの複雑な臨床現場では、最良のソリューションを求めるのに数時間かかることがあり、臨床RTPプロセスの効率を大幅に上げ、しっかりとした品質管理という自動計画の利益を妨げることになる。

【0040】

局所的パレートフロンティアの近似

前述したように、ステップ0では、第1の「自動生成された」ソリューションが、例えば、Pinnacle3自動計画ツールを使用することにより作成される。次に、プランナは、本ソリューション（すなわち、ビームフルエンスプロファイル）を受け取り、送達又は精緻化を行うために選択する。

【0041】

精緻化が必要な場合、次に、本発明は精緻化のステップをより容易に、より迅速に行うために使用されることができる。

【0042】

そのため第1のステップでは、以下にさらに詳細に説明されているように、パレートフロントの近似は、 $N+1$ の計画を最適化することにより決定される。ステップ0で作成される第1のソリューションを「精緻化する」ことが要望されるため、パレート行列 Y には $(N+1)+1=N+2$ の計画（すなわち、 N 「アンカー」計画、「バランス」計画に加え、ステップ0での初期の自動生成された計画）が含まれる。ここで、各ソリューション x_k に対するすべての線量の品質指標 x_k 、 $k=1, \dots, N+2$ は正規化され、パレート行列 $Y=[f(x_1)|f(x_2)|\dots|f(x_{N+1}), f(x_{N+2})]$ を含むために使用される。ここで、 f はベクトル値関数であり、各コンポーネントは、ステップ0で N 線量の品質指標（精緻化スライダ）のうちの1つである。

【0043】

正規化された Y パレート行列がメモリに記憶され、パレートフロント $Y^c=Y^*v$ の凸包区分線形の近似 Y^c を決定するために使用される。

【数 2】

$$Y^c = \left\{ \sum_{k=1}^{N+2} v_k f(x_k) \middle| \sum_{k=1}^{N+2} v_k = 1, v \geq 0 \right\}$$

【0044】

ここで v は、それぞれのナビゲーション解 Y^c における凸結合重みベクトルであり、初期 v_{ini} 値は、ステップ 0 で最適化された計画、すなわち、プランナがさらに精緻化しようとしている計画に関連するものである。

10

【0045】

行列 Y は、 $[0, 1]$ の間で正規化され、係数 v_k は、0 と 1 との間の値を有し、

【数 3】

$$\sum_k v_k = 1$$

現在のスライド位置 / 値（区間 $[0, 1]$ において正規化されている）は、線形計画により係数 v^* の最良の組を検出することもできる。これらから、対応するナビゲーション解

【数 4】

$$x^* = \sum_{k=1}^{N+2} v_k^* x_k$$

20

と、 N スライド位置 $f(x^*) = Y v^*$ としてリカバリし、表示し得る。スライドの位置 $f(x^*)$ は、GUI に表示する前に、初期の範囲に非正規化することができる。

【0046】

第 1 のステップでは、第 0 のステップで決定された最適な自動生成ソリューションの精度が低い場合、本明細書においては、D. Craft 及び C. Richter による「Deliverable navigation for multicriteria step and shoot IMRT treatment planning」、Phys. Med. Biol. (2013), Vol. 58, pp. 87 - 103 の論文において記載されているように、パレートフロンティアのナビゲータを使用することが提案され、本明細書に参照として組み込まれている。パレートフロンティアナビゲータを使用することで、限定された一連の自動計画ソリューション x_k の局所的近傍内で最良の最終計画を求めることを目的とし、ここで「ソリューション」は特定のフルエンスビームプロファイルに対応する。パレートナビゲーションにおける第 1 のステップは、次に一連の計画を決定するために対応し、パレートフロンティアを正確にサンプリングする。この一連の計画は、パレートデータベース計画と称される。この特定の場合においては、制限された一連の準最適な自動計画ソリューション x_k とすべての凸線形結合、すなわち、すべての線形結合を使用することによって、近似パレートフロンティアを構築することが提案され、係数が負でなく合計 1 になる。このように、次のソリューションの検索（つまり、パレートナビゲーション）が、自動計画のソリューション x_k の局所的近傍に限定される。

30

40

【0047】

【数 5】

$$v^* = \arg \min \left\{ z \in \Re \left((Yv)_i - y_i^R + s_i = z, i \in \kappa \setminus \{j\}, (Yv)_j = \tau, \sum_{i=1}^{N+2} v_i = 1, s \geq 0 \right) \right\}$$

を考察する。この線形問題を解くと、新係数集合 v^* （すなわち、新しいソリューション

【数 6】

$$x^* = \sum_{k=1}^{N+2} v_k^* x_k$$

)を検索し、式中、すべての第 i の線量の品質指標は、第 j の線量の品質指標値 (GUI においてユーザによって修正されたスライダに関連する)を除いて、以前のソリューション

【数 7】

$$(Yv)_i - y_i^R + s_i = z$$

10

のうち 1 つに非常に近い値を維持する。このように、ソリューション空間全体の「ナビゲーション」が滑らかであり、新しい位置は以前の位置 / ソリューションにできるだけ近い (局所) ということが確保される。

【0048】

複雑な臨床シナリオにおいては、D. Craft 及び C. Richter による「Deliverable navigation for multicriteria a step and shoot IMRT treatment planning」、Phys. Med. Biol. (2013), Vol. 58, pp. 87-103 の上述の論文に記載されたような、リアルタイムの対話型パレートナビゲータは、自動生成計画の精緻化プロセスに対するプランナの制御性を高めるために配置されることができる。初期においては、自動計画設定のスライダ位置の異なる組み合わせを使用して、自動計画を介して一連の計画が生成される。例えば、1つの考案は「アンカー計画」として称され、各第 k の品質指標を最適化することによって N 計画を決定することができる。換言すれば、各品質指標に対する 1 つの計画は個別に最適化される。これは、1つの指標のスライダ位置は最大値に設定され、一方、すべてのその他のスライダは最小値に設定されることを意味する。次に、スライダの位置が、例えば Pinnacle3 自動計画ツールによって使用され、1つの自動生成ソリューションを取得する。このソリューションはパレート行列 Y に収集される。

20

30

【0049】

1つの追加的な「バランス」計画は、各品質指標に対して類似の重みを使用して最適化される。「バランス計画」という名前は、すべての重みが同じ、すなわち、すべてのチューニングパラメータが等しく重要であることを反映するために選択された。一旦、精緻化された一連の初期の自動計画ソリューションが使用可能になると、一連の初期の精緻化された自動計画ソリューションは、パレート解空間を近似し、ナビゲートするために使用されることができる。好ましくは、各ソリューション x_k に対するすべての線量の品質指標値 x_k は、 $k = 1, \dots, N+2$ とともに正規化され、パレート行列

【数 8】

$$Y = [f(x_1) | f(x_2) | \dots | f(x_{N+2})]$$

40

を含むために使用される。ここで、f はベクトル値関数であり、各コンポーネントは前述した第 0 のステップで線量 N の品質指標 (精緻化スライダ) のうちの 1 つである。N+2 のアンカー計画のうち 1 つが既にすべての臨床目的を満たしている場合には、ソリューションは保持され患者に送達される。そうでない場合は、対話型のリアルタイムパレートナビゲータは、より良いソリューションポイントに移動するために適用される。

【0050】

図 5 は、パレートナビゲータツールの模式的及び例示的なスクリーンショットを示す。線量分布 510 の現在のプロット及び対応する線量容積ヒストグラム 520 が表示される

50

。加えて、パレートナビゲーションスライダ 530a, . . . , 530e (総称してパレートナビゲーションスライダ 530) が表されている。ここで、1つのスライダ 530 が移動されるたびに、線量分布 510 及び対応する線量容積ヒストグラム 520 は、約 2 分の 1 以下の更新時間で、リアルタイムで更新される。

【0051】

パレートフロンティアナビゲータ

一旦、近似パレートフロンティア (すなわち、パレート行列 Y) と与えられると、第 2 のステップは、すべての標的と危険臓器の線量目標との間で、最良のトレードオフを求めるように、プランナがパレート最適空間内でナビゲートすることを可能にするツールが提供されることに対応する。ここで、プランナに簡単に対話型のグラフィカルユーザインタフェースを提供することが提案され、図 6 に示されるように、少なくとも 1 つの (好ましくは各) チューニングパラメータに対し、重要度を増減するためにスライダが提供される。

【0052】

図 6 は、パレートナビゲータツールのスライダ移動の模式的及び例示的な図を示す。例えば、好ましい実施形態では、スライダのうち 1 つが対応する線量の品質測定に対応して増減するために移動されるたびに線形計画の問題が解かれ、基準点から近似された局所パレートフロント上の新しいポイントに向かって移動する。「スライダ」という用語は一般的にコンピューティングにおいて使用され、例えば、水平又は垂直のやり方でインジケータを移動することによって値を設定するために使用されるグラフィカルユーザインタフェース要素を意味する。チューニングパラメータのそれぞれ 1 つのスライダを動かすことで、線形の近似問題におけるチューニングパラメータの重みを増減する。好ましくは、スライダが移動されるたびに、この動作は内側の線形計画問題の最適化を求め、新しいスライダ位置に適合するパレート解の次の最良の凸結合に向かって「移動する」ことを目的とする。したがってユーザは、現在のスライダの位置に新しい位置の品質についてのリアルタイムのフィードバックを与えられる。しかしながら更新が常に問題とならないように線形計画の最適化は非常に迅速であるが、本発明はまた、更新頻度がより少ないトリガを使用するソリューションを含む。

【0053】

パレートフロンティアナビゲーションの間、対応する線量マップ及び線量容積ヒストグラム (DVH) は連続的に更新され、プロットされることが好ましい (更新時間は例えば 1 秒未満)。

【0054】

提案されたナビゲータは、M. Monzらによる「Pareto navigational-algorithmic foundation of interactive multi-criteria IMRT planning」、Phys. Med. Biol. (2008), Vol. 53, pp. 985 - 998 の論文に記載されるようなパレートフロントの凸包の区分線形の近似 Y^c 内を移動し、本明細書に参照として組み込まれる。

【数 9】

$$Y^c = \left\{ \sum_{k=1}^{N+2} v_k f(x_k) \left| \sum_{k=1}^{N+2} v_k = 1, v \geq 0 \right. \right\}$$

【0055】

ここで v は、それぞれのナビゲーション解 Y^c における凸結合重みベクトルである。数学では、ユークリッド空間における点集合 X の凸包又は凸包絡は X を含む最小の凸集合である。例えば X が平面の限定されたサブセットであるとき、凸包は X の周りで伸びるゴムバンドによって形成される形状として視覚化されてよく、de Berg, M.; van Kreveld, M.; Overmars, Mark; Schwarzk

10

20

30

40

50

opf, Oによる「Computational Geometry: Algorithms and Applications」、Springer, pp. 2 - 8, 2000のテキストを参照のこと。形式的には、凸包は、Xを含むすべての凸集合の交点又はXにおけるすべての凸結合ポイント集合と定義され得る。後者の定義では、凸包は、ユークリッド空間から任意の実ベクトル空間へと拡張することができ、これらはさらに指向マトロイドに一般化し得る。Knuth, Donald Eによる「Axioms and hulls」、Lecture Notes in Computer Science no. 606, Heidelberg: Springer-Verlag, p. ix+109, doi:10.1007/3-540-55611-7, ISBN3-540-55611-7, MR1226891, 1992のテキストを参照のこと。

10

【0056】

ここでプランナに簡単に対話型のグラフィックユーザインタフェースを提供することが提案され、各品質指標に対してスライダの調整は、値を変更するために提供される(図5に図示)。好ましくは、スライダが移動されるたびに、この動作は内側の線形計画問題の最小化を求め、現在のスライダ位置を満たす自動生成解 x_k の次の最良の凸結合 x^* に向かって「移動」するために、最良の重みの集合 v^* を求めることを目的とし、

【数10】

$$v^* = \arg \min \left\{ z \in \mathcal{R} \mid (Yv)_i - y_i^R + s_i = z, i \in \kappa \setminus \{j\}, (Yv)_j = \tau, \sum_{i=1}^{N+2} v_i = 1, s \geq 0 \right\} \quad 20$$

ここで、arg minは最小の引数を表し、つまり、 v^* は与えられた関数

【数11】

$$(Yv)_i - y_i^R + s_i = z, i \in \kappa \setminus \{j\}, (Yv)_j = \tau, \sum_{i=1}^{N+2} v_i = 1, s \geq 0$$

が最小値となるための与えられた引数のポイント集合 $z \in \mathcal{R}$ に対応する。ここでjは、移動されるスライダのインデックスであり、 τ は、スライダ選択値であり、 $\kappa := \{1, \dots, N\}$ は、スライダのインデックス集合であり、sは、スラック変数であり、すなわち不等式制約に平等に変換するために加えられる変数である。参照によって本明細書に組み込まれている。Boyd, Stephen P.; Vandenberghe, Lievenによる「Convex Optimization」、Cambridge University Press. ISBN978-0-521-83378-3, 2004の本を参照。基準点 y^R は、第jのスライダが移動される前のスライダの位置に対応する入力Nを有するベクトルを表す。したがって、 τ 値は、第jの指標のために実行され、残りの品質基準における以前のスライダ位置までの最良の距離を求める。パレートフロンティアナビゲーションの間、対応するナビゲーション解(すなわち、フルエン

30

40

スマップ)は、非常に似た最適化された重み v^* ：

【数12】

$$x^* = \sum_{k=1}^{N+2} v_k^* x_k$$

を使用して計算することが可能である。

【0057】

対応する線量マップ及び線量容積ヒストグラムもまた、(2分の1未満の好適な更新時間で)連続的に計算され、表示されることが好ましく、上述のM. Monzらによる「

50

Pareto navigation-algorithmic foundation of interactive multi-criteria IMRT planning」、Phys. Med. Biol. (2008), Vol. 53, p. 985 - 998 の論文に記載されている。ナビゲータのグラフィカルユーザインタフェースの例は、図 5 に示されている。

【0058】

後処理

追加のステップでは、最終のナビゲーション計画 x^* がすべての臨床目的を満たした場合、対応するソリューション（すなわち、フルエンスビームプロファイル）は容易に送達される。一方、パレート近似の精度が低い場合には、チューニングパラメータの最適なセット（すなわち、ナビゲートされたパラメータ）は、ウォームスタートとして使用され、最終の自動生成計画を生成する。換言すれば、パレートナビゲーション解 x^* （すなわち、ビームプロファイル）は、さらに従来の IMRT フルエンスマップの最適化ツールによって処理され得る（例えば、Pinnacle3 のようなすべての放射線治療計画ツールで利用可能である）。

10

【0059】

提案される発明は、自動計画のみを採用する従来の治療計画システムは、要求品質を満たす IMRT 計画を生成することができない場合のすべての臨床症例に適用可能である。大幅な効率向上が実現できリアルタイムの対話及び臨床 IMRT 計画プロセスにおけるしっかりと品質管理は、このようなパレートナビゲートツールを備える治療計画システムを拡張することによって可能になり得る。

20

【0060】

開示された実施形態に対するその他の変更は、図面、開示及び添付の特許請求の範囲の検討をすることにより、特許請求された発明を実行するうえで当業者に理解、達成される。

【0061】

特許請求の範囲において、「comprising」という用語は、他の要素又はステップを排除せず、「a」又は「an」という不定冠詞は、複数を排除するものではない。

【0062】

単一のユニット又はデバイスが、請求項に記載のいくつかの項目の機能を遂行する場合がある。特定の手法が互いに異なる従属請求項に記載されているということだけでは、これらの手法の組み合わせが有効に使用されることができないことを示すものではない。

30

【0063】

パレートフロントの凸包区分線形の近似を決定し、パレートフロンティアをサンプリングする一連の治療計画を決定し、一連の $N + 1$ の治療計画を決定し、 N のアンカーの治療計画を決定し、1 つ又はいくつかのユニット又はデバイスによって実行される 1 つの追加のバランス治療計画等を決定するような決定は、任意のその他の数のユニット又はデバイスによって実行される。例えば、パレートフロントの凸包区分線形の近似の決定は、単一のユニット又は任意のその他の数の異なるユニットによって実行されることができ。前述した放射線治療計画方法による、放射線治療計画システムの制御は、コンピュータプログラム及び / 又は専用のハードウェアのプログラムコード手段として実装されることができ。

40

【0064】

コンピュータプログラムは、光学的記憶媒体又は固体媒体のような、他のハードウェアの一部として供給される好適な媒体に記憶 / 分散され得るが、例えばインターネットやその他の有線又は無線通信システムを介して、その他の形式でも分散される。

【0065】

特許請求の範囲における如何なる参照符号も範囲を限定するものと解釈すべきではない。

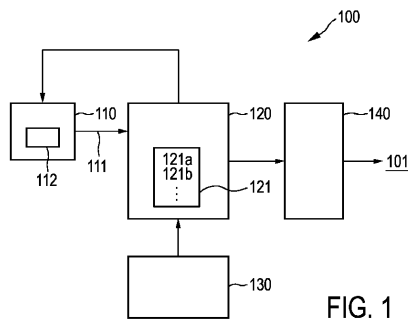
【0066】

50

本発明は、フルエンスプロファイルに対応するソリューションを決定するための放射線治療計画システムに関する。本発明は、パレートフロンティアナビゲータを使用して、一連の様々な自動計画ソリューションから最良の計画を選択することを提案する。対話型のグラフィカルユーザインタフェースがプランナに提供され、自動計画ソリューションの凸結合間をナビゲートする。この提案されたパレート計画ナビゲーションは、さらに任意の精緻化プロセスとして考えられることができ、自動生成されたソリューションが十分にプランナの要件を満たさない場合において、最良の計画を求めるために適用されることができる。一連の自動生成された計画を局所移動するナビゲーションツールは、プランナの決定プロセスを場合により簡略化し、複雑な臨床例の計画時間全体を数時間から数分に減少することができる。

10

【図 1】



【図 2】

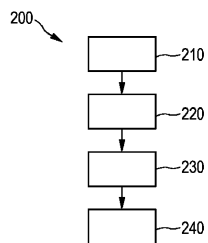


FIG. 2

【図 3】

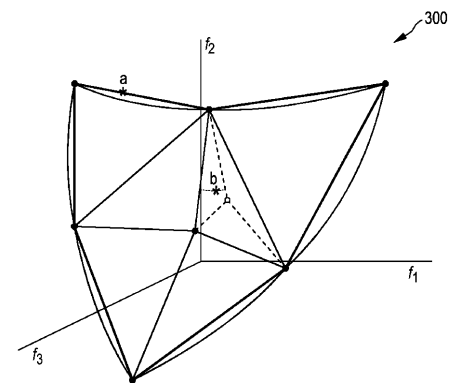
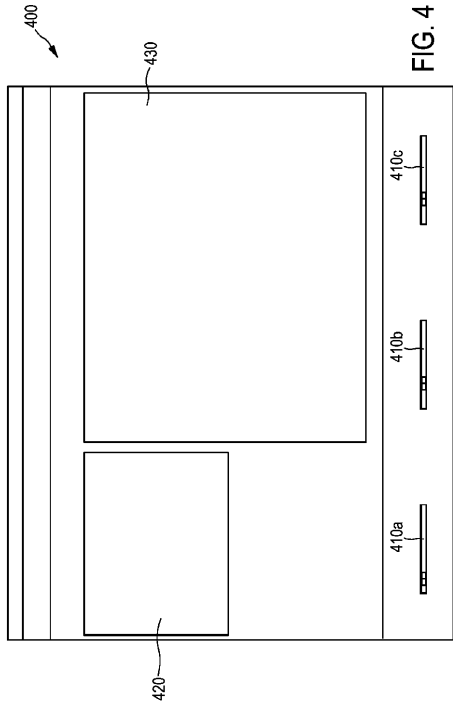
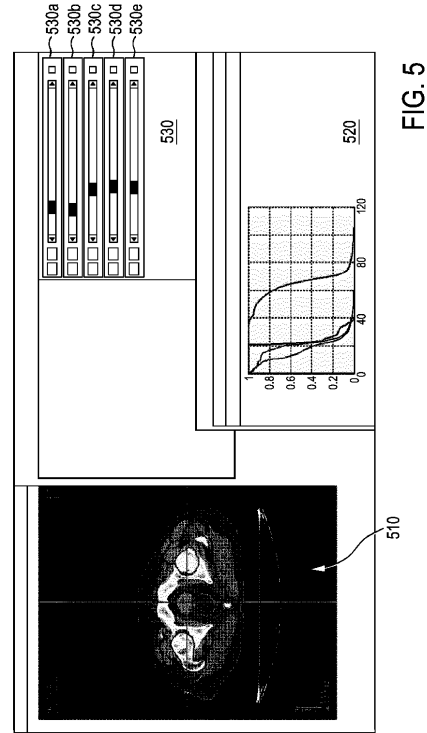


FIG. 3

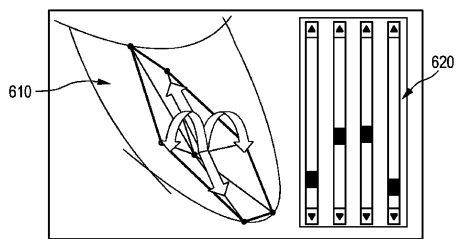
【図 4】



【図 5】



【図 6】



フロントページの続き

(72)発明者 ノイキルチェン クリストフ

オランダ国 5656 アーエー アインドーフェン ハイ テック キャンパス 5

合議体

審判長 千壽 哲郎

審判官 井上 哲男

審判官 宮崎 基樹

(56)参考文献 米国特許出願公開第20110/0085643(US,A1)

WALA, Jeremiah, et al., "Maximizing dosimetric benefits of IMRT in the treatment of localized prostate cancer through multicriteria optimization planning", Medical Dosimetry, 2013, Vol. 38, No. 3, p. 298 - 303

HONG, Theodore S., et al., "Multicriteria optimization in intensity-modulated radiation therapy treatment planning for locally advanced cancer of the pancreatic head", International Journal of Radiation Oncology Biology Physics, 2008, Vol. 72, No. 4, p. 1208 - 1214

SALARI, Ehsan, et al., "Exploring trade-offs between VMAT dose quality and delivery efficiency using a network optimization approach", Physics in Medicine & Biology, 2012, Vol. 57, No. 17, p. 5587 - 5600

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

A61N 5/10