

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B1)

(11) 特許番号

特許第6510150号
(P6510150)

(45) 発行日 令和1年5月8日(2019.5.8)

(24) 登録日 平成31年4月12日(2019.4.12)

(51) Int.Cl.		F I			
A 6 1 B	6/03	(2006.01)	A 6 1 B	6/03	3 6 0 J
A 6 1 B	5/055	(2006.01)	A 6 1 B	6/03	3 6 0 T
G 0 6 T	1/00	(2006.01)	A 6 1 B	5/055	3 8 0
			G 0 6 T	1/00	2 9 0 B

請求項の数 13 (全 18 頁)

(21) 出願番号	特願2018-555659 (P2018-555659)	(73) 特許権者	590000248
(86) (22) 出願日	平成29年5月4日(2017.5.4)		コーニンクレッカ フィリップス エヌ ヴェ
(86) 国際出願番号	PCT/EP2017/060634		KONINKLIJKE PHILIPS N. V.
(87) 国際公開番号	W02017/191248		オランダ国 5656 アーエー アイン ドーフエン ハイテック キャンパス 5
(87) 国際公開日	平成29年11月9日(2017.11.9)		High Tech Campus 5, NL-5656 AE Eindhoven
審査請求日	平成30年10月23日(2018.10.23)	(74) 代理人	100122769
(31) 優先権主張番号	16168226.5		弁理士 笛田 秀仙
(32) 優先日	平成28年5月4日(2016.5.4)	(74) 代理人	100163809
(33) 優先権主張国	欧州特許庁 (EP)		弁理士 五十嵐 貴裕
早期審査対象出願			

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 医療アトラス登録

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

医療画像におけるアトラス登録を可能とするためのシステムであって、前記アトラス登録は、医療画像に医療アトラスをマッチングするステップを有し、前記システムは、

前記医療アトラスを定義するアトラスデータにアクセスするための第1の入力インタフェースと、

前記医療画像の画像データにアクセスするための第2の入力インタフェースと、プロセッサと、

を有し、前記プロセッサは、

前記医療画像に前記医療アトラスをマッチングするためのモデルを学習するための強化学習アルゴリズムを実行するよう構成され、前記学習は、前記医療アトラスと前記医療画像との間のマッチングの度合いを定量化する報酬関数に基づくものであり、前記プロセッサは更に、

前記アトラスデータと、前記画像データと、から抽出された特徴のセットに基づいて、前記強化学習アルゴリズムについての状態空間を決定し、

前記医療アトラスに適用されるために利用可能な変換動作の所定のセットに基づいて、前記強化学習アルゴリズムのための動作空間を決定する

よう構成され、前記動作空間は、種々のレベルに構造化され、

前記種々のレベルのそれぞれは、前記変換動作のサブセットを有し、前記種々のレベルは、変換動作の階層を形成し、前記強化学習アルゴリズムによる変換動作のシーケンスの

10

20

選択が、前記階層における下向きの進行に制約された、システム。

【請求項 2】

前記プロセッサは、機械学習アルゴリズムを用いて、前記アトラスデータ及び前記画像データから抽出されるべき特徴のセットを学習するよう構成された、請求項 1 に記載のシステム。

【請求項 3】

前記プロセッサは、前記アトラスデータ及び前記画像データに畳み込みニューラルネットワーク又はオートエンコーダを適用して前記特徴のセットを決定するよう構成された、請求項 2 に記載のシステム。

【請求項 4】

前記動作空間は、前記階層において上向きの、より制約の少ない変換動作と、前記階層において下向きの、より制約の多い変換動作と、を有するよう階層構造化された、請求項 1 に記載のシステム。

【請求項 5】

前記プロセッサは、機械学習アルゴリズムを用いて又は所定の経験則を用いて、前記動作空間の前記階層構造化を実行するよう構成された、請求項 1 乃至 4 のいずれか一項に記載のシステム。

【請求項 6】

前記プロセッサは、変換動作の前記階層における現在のレベルに更に基づいて、前記強化学習アルゴリズムのための前記状態空間を決定するよう構成された、請求項 1、4 又は 5 のいずれか一項に記載のシステム。

【請求項 7】

前記医療アトラスに適用されるために利用可能な変換動作の所定のセットは、前記アトラスデータにより定義された、請求項 1、4、5 又は 6 のいずれか一項に記載のシステム。

【請求項 8】

前記プロセッサは、前記医療アトラスにおける目印を定義する目印データに更に基づいて、前記強化学習アルゴリズムのための状態空間を決定するよう構成された、請求項 1 乃至 7 のいずれか一項に記載のシステム。

【請求項 9】

前記強化学習アルゴリズムは、深層強化学習アルゴリズムである、請求項 1 乃至 8 のいずれか一項に記載のシステム。

【請求項 10】

請求項 1 乃至 9 のいずれか一項に記載のシステムを有するワークステーション。

【請求項 11】

請求項 1 乃至 9 のいずれか一項に記載のシステムにより生成される医療画像におけるアトラス登録のためのモデルを表す持続性又は非持続性データを有する、コンピュータ読み取り可能な媒体。

【請求項 12】

医療画像におけるアトラス登録を可能とする方法であって、前記アトラス登録は、医療画像に医療アトラスをマッチングするステップを有し、前記方法は、

前記医療アトラスを定義するアトラスデータにアクセスするステップと、

前記医療画像の画像データにアクセスするステップと、

前記医療画像に前記医療アトラスをマッチングするためのモデルを学習するための強化学習アルゴリズムを実行するステップであって、前記学習は、前記医療アトラスと前記医療画像との間のマッチングの度合いを定量化する報酬関数に基づくものであるステップと、

前記アトラスデータと、前記画像データと、から抽出された特徴のセットに基づいて、前記強化学習アルゴリズムについての状態空間を決定するステップと、

前記医療アトラスに適用されるために利用可能な変換動作の所定のセットに基づいて、

10

20

30

40

50

前記強化学習アルゴリズムのための動作空間を決定するステップであって、前記動作空間は、種々のレベルに構造化されたステップと、
を有し、前記種々のレベルのそれぞれは、前記変換動作のサブセットを有し、前記種々のレベルは、変換動作の階層を形成し、前記強化学習アルゴリズムによる変換動作のシーケンスの選択が、前記階層における下向きの進行に制約された、方法。

【請求項 13】

請求項 12 に記載の方法をプロセッサシステムに実行させるための命令を表す持続性又は非持続性データを有する、コンピュータ読み取り可能な媒体。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

10

【0001】

本発明は、医療撮像におけるアトラス登録を可能とするためのシステム及び方法に関する。本発明は更に、該システムを有するワークステーションに関する。本発明は更に、該方法をプロセッサシステムに実行させるための命令を有するコンピュータ読み取り可能な媒体に関する。

【背景技術】

【0002】

医療画像に医療アトラス(atlas)を登録することにより、患者の医療画像のグラフィカルな注記又はセグメント化を提供することは知られている。例えば、医療アトラスは、特定の視野(FOV)についての、例えば組織の境界輪郭の記述のような、組織の幾何学的な記述を有し得る。しかしながら、患者は異なる形状及びサイズの組織を持つため、医療画像は患者によって大きく異なり得る。そのため、医療画像に医療アトラスを登録することは、簡単でない作業であると考えられる。

20

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0003】

数学的には、医療アトラス登録は、最適化問題として記述されることができ、マッチング関数により医療画像への最適な登録を提供する医療アトラスの変形、又は変形のセットを定義する、モデルのパラメータ値のセットが決定される必要がある。斯かる医療アトラス登録における核となる課題のひとつは、殆どのマッチング関数について、医療アトラスと医療画像との間の完全な整合のみが、完全なマッチングをもたらすという事実に起因すると認識されている。インクリメンタルな改善は、誤りをもたらすものであり得る。即ち、最適化問題は一般に凸ではない。そのため、傾斜降下最適化器は、局所極小に「捕捉」される見込みが高い。同時に、全てのとり得る(個々の)変形(のシーケンス)は、数学的に困難な問題であるため実行可能ではない。

30

【0004】

以上の問題に対するとり得る方法は、Erik Breschらによる論文「Region segmentation in the frequency domain applied to upper airway real-time magnetic resonance images」(Medical Imaging, IEEE Transactions on 28.3 (2009) 323-338)に記載されている。ここでは、人間の声道の正中縦断MRIスキャンについてのアトラス登録の方法が記載され、該方法は該アトラスの制約された変換の階層を利用する。これにより、マッチング整合が達成され得なくなるまで、最初に粗い大きなスケールの整合が実行され、その後のみ、粒度の細かいワーピングが実行される。該論文においては、一連の4つの別個の、次第に制約されなくなるワーピング操作が利用される。変換空間の当該一時的な制約は、最適化問題のエネルギー状況の平滑化に導くと言われ、局所極小に「捕捉」されるリスクを軽減する。

40

【0005】

しかしながら、上記の論文において提案された方法は、経験的にのみ調整された帰納的な構成要素を持つ、当該特定のアトラスについてのみ設計されたものである。異なるアトラスのマッチング問題に同様の手法を適用することは、低速で煩わしいタスクとなる。

50

【 0 0 0 6 】

Tayebeh Lotfi Mahyariによる修士論文「Uncertainty in Probabilistic Image Registration」は、3.5節において、反復的な画像登録手順をガイドするため強化学習を利用することを記載している。更に、Tayebeh Lotfiらによる「Improving Probabilistic Image Registration via Reinforcement Learning and Uncertainty Evaluation」と題された文献は、空間的な変換に対して確率分布を割り当てることを含む確率的画像登録のための枠組みを記載している。

【 0 0 0 7 】

深層ニューラルネットワークにおける技術的な背景は、De Brebisson Alexandreらによる「Deep neural networks for anatomical brain segmentation」（2015年6月7日）から得られる。自動エンコーダにおける技術的な背景は、Vaidhya Kiranらによる「Multi-modal Brain Tumor Segmentation Using Stacked Denoising Autoencoders」（2015年10月5日）から得られる。（深層）強化学習における技術的な背景は、「Human-level control through deep reinforcement learning」（Nature、2015年2月26日）及びチュートリアル「Reinforcement Learning: A Tutorial Scope of Tutorial」（1996年1月1日）から得られる。

10

【 0 0 0 8 】

医療画像におけるアトラス登録のためのモデルを生成するための、改善されたシステム及び方法を持つことは有利となり得る。

【 課題を解決するための手段 】

20

【 0 0 0 9 】

本発明の第1の態様は、医療画像におけるアトラス登録を可能とするためのシステムであって、前記アトラス登録は、医療画像に医療アトラスをマッチングするステップを有し、前記システムは、

前記医療アトラスを定義するアトラスデータにアクセスするための第1の入力インタフェースと、

前記医療画像の画像データにアクセスするための第2の入力インタフェースと、
プロセッサと、

を有し、前記プロセッサは、

前記医療画像に前記医療アトラスをマッチングするためのモデルを学習するための強化学習アルゴリズムを実行するよう構成され、前記学習は、前記医療アトラスと前記医療画像との間のマッチングの度合いを定量化する報酬関数に基づくものであり、前記プロセッサは更に、

30

前記アトラスデータと、前記画像データと、から抽出された特徴のセットに基づいて、前記強化学習アルゴリズムについての状態空間を決定する

よう構成されたシステムを提供する。本発明の更なる態様は、該システムを有するワークステーションを提供する。本発明の更なる態様は、該システムにより生成される医療画像におけるアトラス登録のためのモデルを表す非持続性又は持続性データを有する、コンピュータ読み取り可能な媒体を提供する。

【 0 0 1 0 】

40

本発明の更なる態様は、医療画像におけるアトラス登録を可能とする方法であって、前記アトラス登録は、医療画像に医療アトラスをマッチングするステップを有し、前記方法は、

前記医療アトラスを定義するアトラスデータにアクセスするステップと、

前記医療画像の画像データにアクセスするステップと、

前記医療画像に前記医療アトラスをマッチングするためのモデルを学習するための強化学習アルゴリズムを実行するステップであって、前記学習は、前記医療アトラスと前記医療画像との間のマッチングの度合いを定量化する報酬関数に基づくものであるステップと、

前記アトラスデータと、前記画像データと、から抽出された特徴のセットに基づいて、

50

前記強化学習アルゴリズムについての状態空間を決定するステップと、
を有する方法を提供する。

【0011】

以上の手法は、コンピュータ断層撮影（CT）、磁気共鳴撮像（MRI）、超音波（US）、陽電子放出断層撮影（PET）等のような、撮像モダリティにより取得された、患者の医療画像の画像データにアクセスすることを含む。更に、医療アトラスを定義するアトラスデータがアクセスされる。斯かる定義は、医療アトラス生成の分野において、それ自体知られた態様であり得る。例えば、アトラスデータは、組織の境界輪郭の幾何学的な記述を有しても良い。他の例は、医療アトラスがテンプレート画像であり得、アトラスデータがテンプレート画像データであり得る場合である。

10

【0012】

医療アトラスを医療画像にマッチングするためのモデルは、強化学習（RL）アルゴリズムを用いて学習される。強化学習アルゴリズムは機械学習の分野においてそれ自体が知られており、状態空間を定義する環境状態のセットと、動作空間を定義する動作のセットと、を有するトレーニングモデルを利用することが知られている。出力として、数学的な表現又はアルゴリズムを参照する学習されたモデルが得られ、そのパラメータは、トレーニングの間に学習されたものであり、所与のシステムの特定の状態に対してそれぞれのとり得る動作の値を計算するよう構成される。斯かる動作は、例えば範囲、大きさ、距離等が制約されたものであっても良い、並進、回転、変形等のような変換動作を含み得る。生成された後、所与の特定の状態に対して、それぞれの変換動作の値のためのモデルが、例えば探索 - 活用（explore-exploit）アルゴリズムを用いて、クエリ送信されても良い。例えば、最も高い値が、最も高い報酬を表し得、従って報酬関数による「最適な」変換動作を表し得る。

20

【0013】

RLアルゴリズムにおいて用いられる報酬関数は、変換される医療アトラスが医療画像にどの程度マッチングするかを定量化し得る。例えば、医療アトラスがテンプレート画像により構成されている場合、報酬関数は、医療画像の画素値と変換された医療アトラスとの絶対差の合計（SAD）であり得る。一般に報酬関数は、例えば医療アトラスが画像データにより表されるか及び/又は幾何学的データにより表されるかといった、医療アトラスのタイプにマッチングするよう選択され得る。

30

【0014】

本発明者は、強化学習はいわゆる遅延報酬をモデル化するのに好適であるため、医療アトラス登録の問題に強化学習が対処し得ると認識した。即ち、1つ以上の局所的な最小値に隣接する大域的な最小値の医療アトラス登録における共存は、斯かる遅延報酬を表し得、報酬（例えば該大域的な最小値に到達する）は遅延の後にのみ到達し得る（例えば、局所的な最小値を大域的な最小値へと遷移させるときの即時の報酬における低減）。

【0015】

しかしながら、本発明者は更に、既知のRLアルゴリズムについては状態空間が高過ぎる次元を持つため、RLは医療アトラス登録の問題に直接には適用されることができないことを認識した。即ち、状態空間は通常、医療アトラスの内容及び医療画像の内容を含み、例えば画素値の全てを含み、過度に大きなサイズを持つ、RLに適さない状態空間を導出し得る。

40

【0016】

以上の手段によれば、状態空間は、低レベルのアトラスデータ又は画像データを直接用いる代わりに、高レベルの特徴に基づいて決定される。即ち、特徴のセットは、アトラスデータ及び画像データから抽出される。そのため、有益であり冗長ではないことが意図される特徴は、例えば既知の特徴抽出アルゴリズムを用いて抽出され、それにより医療アトラス及び画像データの低減された表現が得られる。斯かる低減された表現は、低い次元を持つ状態空間を実現する。効果的に、状態空間の次元低減が得られる。

【0017】

50

以上の手法は、経験則の利用なく、又は低減された利用により、医療撮像におけるアトラス登録のためのモデルが得られるという効果を持つ。即ち、機械学習ベースの手法を用いることにより、例えば種々のタイプの医療アトラス及び/又は医療画像といった、種々のアトラスマッチング問題に対する解法が、容易に適用されることができる。特に、以上の手法は、アトラス登録の問題に特に適し且つ少なくとも好適に低減された状態空間に基づいて該問題に適用され得る機械学習アルゴリズムとして、強化学習を利用することを可能とする。

【0018】

これに加えて、前記プロセッサは、前記医療アトラスに適用されるよう利用可能な変換動作の所定のセットに基づいて、強化学習アルゴリズムのための動作空間を決定するよう構成されても良い。強化学習は、動作として変換を提供することによりアトラス登録に適用され得る。ここで、「変換動作」なる用語は、医療アトラスから医療画像への変換全体のうちの一部を構成する変換を示し得る。例えば、変換動作は、選択された境界輪郭と関連し得るか、又は選択された境界輪郭にのみ適用される。他の例は、或る変換動作が、選択された境界輪郭の並進を定義し得、他の変換動作が、選択された境界輪郭の回転を定義し得るものである。反復的にモデルをクエリ送信し変換動作を選択することにより、医療アトラスに適用されたときに医療画像にマッチングするよう医療アトラスを変形する変換動作のシーケンスが得られ、これにより医療画像に対する医療アトラスの登録が得られる。強化学習アルゴリズムのための動作空間は、医療アトラスに適用されるよう利用可能な変換動作の所定のセットに基づいて決定されても良い。例えば、変換動作のセットは、医療アトラス定義の一部であっても良い。具体的な例は、輪郭又は輪郭のセットを定義する医療アトラスに加えて、当該輪郭又は輪郭のセットのとり得るセットが、医療アトラス及び/又はアトラスデータにより定義されても良い。

【0019】

前記動作空間は、種々のレベルに構造化されても良く、前記種々のレベルのそれぞれは、前記変換動作のサブセットを有し、前記種々のレベルは、変換動作の階層を形成し、前記強化学習アルゴリズムによる変換動作のシーケンスの選択が、前記階層における下向きの進行に制約される。状態空間と同様に、動作空間も、RLに直接に適用されるには大き過ぎる見込みが高い。本発明者は、利用可能な全ての変換動作のサブセットのみを有するレベルのそれぞれにより変換動作のシーケンスの数が減少させられ得るため、上述した論文「Region segmentation in the frequency domain applied to upper airway real-time magnetic resonance images」(IV.C節「Hierarchical Gradient Descent Procedure」に記載された階層構造に関して、参照により本明細に組み込まれたものとする)に記載された変換の階層構造が、一般的に動作空間のサイズの低減をもたらすことを認識した。例えば、該階層は、より制約の少ない変換動作から、より制約の大きな変換動作へのものであっても良い。特定の例においては、最も高い階層レベルは、大域的な又は領域的な変換動作のみを有しても良く、後続する階層レベルは、局所的な変換動作のみを有しても良い。ここで大域的、領域的及び局所的なる用語は、変換動作が適用される減少する空間的な程度を示し得る。例えば、大域的な変換動作は、医療アトラスの全ての境界輪郭に適用され得、局所的な変換動作は、選択された境界輪郭にのみ適用され得る。本例においては、付随する動作空間において、局所的な変換動作は、大域的な変換動作に後続され得ない。以上の手法の効果は、例えば状態空間におけるいずれかの状態における、いずれかの時点において利用可能な変換動作のセットが、RLアルゴリズムのために管理可能とされる点である。

【0020】

任意に、前記プロセッサは、機械学習アルゴリズムを用いて、アトラスデータ及び画像データから抽出されるべき特徴のセットを学習するよう構成される。例えば、該プロセッサは、畳み込みニューラルネットワーク(CNN)又はオートエンコーダをアトラスデータ及び画像データに適用して、特徴のセットを決定するよう構成されても良い。CNNは深層CNNであっても良い。該深層CNN(「Human-level control through deep reinf

10

20

30

40

50

orcement learning」(Nature 518、529-533、2015年2月26日)に記載されたDeepQ Network手法に類似する)及び深層オートエンコーダアルゴリズムのような深層学習手法は、アトラスデータ及び画像データからの特徴抽出に適していることが見出されている。深層オートエンコーダについては、RLアルゴリズムとは独立して、状態空間表現モデル(オートエンコーダ)が学習され得ることに留意されたい。所与の状態について各動作の値をクエリ送信するため深層CNNが直接に用いられる場合には、深層CNNのトレーニングがRLアルゴリズムにより実行されても良い。

【0021】

任意に、動作空間は、種々のレベル間の遷移を定義する1つ以上の遷移動作を有する。レベルの1つ以上に遷移動作を追加することにより、RLアルゴリズムの強化学習エージェントが、特定のレベルにおいて動作を評価するか、又は種々のレベルの動作を評価する異なるレベルに切り換えても良い。任意に、前記プロセッサは、機械学習アルゴリズムを用いて又は所定の経験則を用いて、前記動作空間の階層構造化を実行するよう構成される。

10

【0022】

任意に、前記プロセッサは、前記動作空間における現在のレベルに更に基づいて、強化学習アルゴリズムのための状態空間を決定するよう構成される。該動作空間における現在のレベルは、状態空間における現在の状態を同時に定義する。このことは、例えば大局的な変換から局所的な変換のような、階層的な態様で医療アトラスを変換するよう、RLアルゴリズムが学習することを可能とし得る。例えば、現在レベル変数は、深層CNNの場合には医療アトラス概念に「添付」され得る。深層エンコーダの場合には、当該変数は、RLエージェントへの入力として用いられ得、次いで現在の状態において利用可能な変換動作の数を制限することを可能とし得る。

20

【0023】

任意に、前記プロセッサは、前記医療アトラスにおける目印を定義する目印データに更に基づいて、強化学習アルゴリズムのための状態空間を決定するよう構成される。該医療アトラスは、他の解剖学的構造を位置決めするための向きの点として用いられ得る解剖学的構造を指す、医療アトラスにおける目印を定義する目印データにより付随され得る。斯かる目印は、強化学習アルゴリズムの状態関数を決定するための特徴として、直接的に又は間接的に用いられ得る。

30

【0024】

任意に、医療画像に適用されるのに利用可能な変換動作のセットは、アトラスデータにより定義される。

【0025】

任意に、強化学習アルゴリズムは、深層強化学習アルゴリズムである。

【0026】

上述した本発明の実施例、実装及び/又は任意の態様の2つ以上が、有用と考えられるいずれの態様で組み合わせられても良いことは、当業者には理解されるであろう。

【0027】

該システムの説明された変更及び変形に対応する、方法及び/又はコンピュータプログラムの変更及び変形は、本明細書に基づいて当業者により実行され得る。

40

【0028】

該システム及び方法は、限定するものではないが、例えば標準的なX線撮像、コンピュータ断層撮影(CT)、磁気共鳴撮像(MRI)、超音波(US)、陽電子放出断層撮影(PET)、単光子放出コンピュータ断層撮影(SPECT)及び各医学(NM)のような、種々の取得モダリティにより取得された、例えば2次元(2D)、3次元(3D)又は4次元(4D)画像のような多次元画像データに適用され得ることは、当業者は理解するであろう。

【0029】

本発明のこれらの及び他の態様は、以下の説明において例として記載された実施例を参

50

照しながら、また以下に説明される実施例を参照しながら、説明され明らかとなるであろう。

【図面の簡単な説明】

【0030】

【図1】医療画像におけるアトラス登録を可能とするためのシステムを示す。

【図2(A)】人間の声道における解剖学的構造を示す。

【図2(B)】人間の声道についての医療アトラスを示す。

【図2(C)】医療アトラスの画像モデルを示す。

【図3(A)】患者の声道の医療画像を示す。

【図3(B)】医療画像に医療アトラスが登録されていないか又は大局的には登録されていない、医療画像に重畳する医療アトラスを示す。

10

【図3(C)】強化学習により学習されたモデルに従って医療画像に登録された医療アトラスを示す。

【図4】医療アトラスの登録を最適化する処理を示す。

【図5】医療画像におけるアトラス登録を可能とする方法を示す。

【図6】プロセッサシステムに本方法を実行させるための命令を有するコンピュータ読み取り可能な媒体を示す。

【発明を実施するための形態】

【0031】

図面は単に図式的なものであり、定縮尺で描かれていないことは、留意されるべきである。図面において、既に説明された要素に対応する要素は、同じ参照番号を持ち得る。

20

【0032】

図1は、医療画像におけるアトラス登録を可能とするためのシステム100を示す。システム100は、医療アトラスを定義するアトラスデータ022にアクセスするための第1の入力インタフェース120と、医療画像の画像データ042にアクセスするための第2の入力インタフェース140と、を有するものとして示される。図1の例においては、これらタイプのデータは、別個の保存部、即ちアトラスデータ保存部020及び画像データ保存部040からアクセスされるものとして示される。例えば、アトラスデータ保存部020及び/又は画像データ保存部040は、システム100が接続され得る又は有し得る、病院情報システム(HIS)の画像保存及び通信システム(PACS)の一部により構成されるか、又は該一部であっても良い。従って、システム100は、HISを介してアトラスデータ020及び/又は画像データ040へのアクセスを得ても良い。代替としては、アトラスデータ020及び/又は画像データ040は、システム100の内部データ保存部からアクセスされても良い。一般的に、入力インタフェース120、140のそれぞれ又は両方のタイプは、例えばローカルエリアネットワーク又は例えばインターネットのようなワイドエリアネットワークへのネットワークインタフェース、内部又は外部データ記憶部への記憶部インタフェース等のような、種々の形をとり得る。

30

【0033】

システム100は更に、アトラスデータ020及び画像データ042へのアクセスを得るためそれぞれの入力インタフェース120、140に接続された、プロセッサ160を有する。プロセッサ160は、システム100の動作の間、医療アトラスを医療画像にマッチングするためのモデルを学習するよう強化学習アルゴリズムを実行するよう構成され、ここで該学習は、医療アトラスと医療画像との間のマッチングの度合いを定量化する報酬関数に基づくものである。更に、該実行の前に又は該実行の一部として、プロセッサ160は、i)アトラスデータ及びii)画像データから抽出された特徴のセットに基づいて、強化学習アルゴリズムのための状態空間を決定し、医療アトラスに適用されるのに利用可能な変換動作のセットに基づいて、強化学習アルゴリズムのための動作空間を決定しても良い。そのため、強化学習アルゴリズムは、該決定された状態空間及び動作空間に基づいて実行されても良い。出力として、プロセッサ160は、学習されたモデルを表すモデルデータ062を生成しても良い。図1には明示的に示されていないが、モデルデータ0

40

50

62は、例えばデータベースに保存されても良く、アトラス登録を実行するためにシステム100により利用されても良く、アトラス登録を実行するため他のシステム又は装置に供給されても良い、等する。

【0034】

種々の動作態様を含む、システム100の種々の動作は、図2乃至4を参照しながら更に説明される。

【0035】

システム100は、パーソナルコンピュータ、ワークステーション、サーバ又は撮像装置のような、単一の装置又は機器として、又は斯かる単一の装置又は機器において、実装されても良い。該装置又は機器は、適切なソフトウェアを実行する1つ以上のマイクロプロセッサを有しても良い。該ソフトウェアは、例えばRAMのような揮発性メモリ、又はフラッシュのような不揮発性メモリといった、対応するメモリにダウンロード及び/又は保存されていても良い。代替としては、例えば第1の入力インタフェース、第2の入力インタフェース及びプロセッサのような、該システムの機能ユニットは、例えばフィールドプログラマブルゲートアレイ(FPGA)のようなプログラム可能な論理回路の形で該装置又は機器に実装されても良い。一般的に、該システムの各機能ユニットは、回路の形で実装されても良い。システム100は、例えば種々の装置又は機器を含む、分散された態様で実装されても良い。例えば、該分散は、クライアント-サーバモデルに従うものであっても良い。

【0036】

図2Aは、アトラス登録の適用領域の例として、本図及び以下の図において利用される、人間の声道における解剖学的構造を示す。特に、図2Aは、舌、硬口蓋、喉頭蓋、声門及び咽頭壁を含む、人間の声道の正中縦断図における解剖学的構造の選択を示す。

【0037】

図2Bは、人間の声道についての医療アトラスを示す。本例においては、該アトラスは、人間の声道の正中縦断図において、解剖学的構造の幾何学的な記載を有し、アトラスデータが、解剖学的構造の境界輪郭を定義する。特に、アトラス300は、3つの別個の対象領域 R_1 、 R_2 、 R_3 の境界を有するものとして示される。更に、図2Bにおいて P_x により示される、例えば目印データの形をとる、境界輪郭に沿った種々の目印が定義されている。

【0038】

図2Cは、医療アトラスの幾何学的記述に任意に付随していても良く、本例においてはMRIスキャンに起因する一般的に予測される強度画像に図2のトポロジカルな情報を関連付け得る、医療アトラスの画像モデル310を示す。画像モデル310は、空気を表す黒の背景に対して、組織を表す3つの等しい強度の領域を持つよう理想化されて示される。

【0039】

図3Aは、患者の声道の医療画像320を示す。当該医療画像320は、図2Bの医療アトラス300として、声道のおよそ同じ視野(FOV)を提供し、従って解剖学的な組織の同じ全体的な構造を示す。しかしながら、解剖学的な組織の正確な形状及び位置は、医療アトラスによる表現とは正確には異なる。従って、医療アトラスを医療画像320に単純に適用することはできない。即ち、斯かる適用の結果は図3Bに示され、ここでは医療アトラス300の境界輪郭が、医療画像320に示された解剖学的な組織とマッチングしていないことが分かる。大域的な登録もまた、所望のマッチングを導出しないことに留意されたい。

【0040】

図3Cは、強化学習により学習されるモデルに従って医療画像に登録された医療アトラスを示す。マッチングの品質は、Erik Breschらによる論文「Region segmentation in the frequency domain applied to upper airway real-time magnetic resonance images」(Medical Imaging, IEEE Transactions on 28.3(2009年):323-338)に記載された登録

10

20

30

40

50

技術により得られるものと同様であっても良い。しかしながら、上述の論文において提案された方法は、経験的にのみ正当化された経験則要素を用い、当該特定のアトラスに対してのみ設計されたものである。強化学習は、種々の解剖学的構造、種々の身体部分、種々のタイプのアトラス、種々の画像モダリティ、等のような、種々のアトラスのマッチング問題について、モデルが学習されることを可能とする。

【0041】

即ち、探索により変換動作の最適なシーケンスを学習するために合理的な手法が適用される点において、アトラス登録の問題が本発明者により強化学習の枠組みにはめ込まれる。しかしながら、本発明者は、アトラス登録を強化学習問題としてはめ込むためには、2つの大きな課題があり得ることを認識した。即ち、RLアルゴリズムへの入力は、医療画像及び医療アトラスであり、後者は典型的には、幾何学的な記述及び/又はテンプレート画像である。RLアルゴリズムについての状態として当該入力を利用することは、画像データ及びアトラスデータの高い次元が、RLについての状態として直接に用いられるのに適していない点において、第1の課題をもたらす。従って、特徴のセットが、アトラスデータ及び画像データから抽出される。該特徴のセットは、手動で定義されても良い。代替としては、抽出されるべき該特徴のセットは、機械学習アルゴリズムを用いて学習されても良い。特に、入力として画像データ及びアトラスデータを用いて高レベルの状態空間表現を生成するために、深層畳み込みニューラルネットワークが利用されても良い。当該高レベルの状態空間は典型的には、対処可能なサイズを持ち、効率の良い強化学習を可能とする。

【0042】

アトラス登録を強化学習問題としてはめ込む他の課題は、典型的にアトラスへの全てのとり得る変換が、RLの枠組みにおいて動作として定義される必要がある点である。しかしながら、典型的には大量の利用可能な変換があり、動作空間を大きくする。この問題に対処するため、変換動作は、階層的に構造化されても良い。アトラスへの変換の階層的な構造化は、例えばErik Breschらによる上述の論文において記載されているように、効率的な経験則設計を可能とする、アトラス登録の分野において知られた手法である。当該手法は、RLの枠組み内で適用されることができ、それによりRLの枠組みについて管理可能ないずれの時点においても、利用可能な変換動作のセットを作成する。

【0043】

動作空間がどのように階層的に構造化され得るかの例として、Erik Breschらによる上述の論文の節IV.C「Hierarchical Gradient Descent Procedure」に記載された階層的な構造化が、ここで参照により本明細に組み込まれたものとする。即ち、声道に記載されたモデルは、以下の4つのレベルに階層的に構造化された変換動作によって最適化されても良い。

- ・レベル1：変換動作として、3領域モデル幾何全体の変換及び回転のみを許容し、これにより対象の面内の頭部の動きを補償する。
- ・レベル2：変換動作として、各領域の境界の変換及び回転のみを許容し、これにより粗い現在の声道の姿勢にモデルをフィッティングする。
- ・レベル3：変換動作として、上述した論文の表III乃至表Vのセクション毎のブースティング関数に従う、各解剖学的なセクションの、例えば並進、回転及びスケーリングのような、堅固な変換のみを許容する。
- ・レベル4：変換動作として、全ての領域の個々の頂点の全ての独立した動きを許容する。

【0044】

斯くして、当該手法は、最初に好適な大局的なマッチングを見つけるよう試み、次いでより小さな詳細の最適化へとズームする。斯くして、RLアルゴリズムは、高いレベルの動作が、低いレベルの動作によってのみ後続され、その逆はない点において、動作を制約され得る。以上は限定するものではない例であり、例えば種々のタイプの医療画像、種々のタイプの医療アトラスのような、動作空間を階層的に構造化する代替の方法も、当業者

には想到可能であることは、理解であるであろう。

【 0 0 4 5 】

医療アトラス登録に対する強化学習の提案される適用を更に参照しながら、以下が言及される。一般的なシステムのモデルは、環境に対する動作を実行し得るエージェントを有しても良く、一方で該エージェントは、環境の現在の状態及び現在の報酬についての情報を受信しても良い。エージェントのタスクは、一時的に最適ではない動作を選択することを意味する場合であっても、将来における報酬を最大化する動作を選択するものでも良い。しかしながら、エージェントが追従すべき好適な方針は何か、そして該方針はどのように実装されるべきか。Bresch及びNarayananは、試行錯誤を用いて人間により設計された固定スケジュールの方針を以前に実装している。より合理的で適応的な手法は、10

【 0 0 4 6 】

本発明の有利な実施例においては、RLAが、医療アトラスを変換する動作を実行することを可能とされ、現在の報酬情報に基づいて、及びセンサ入力： $Q = f(\text{入力画像、アトラス、動作})$ から深層ニューラルネットワークにより生成されたものでも良い「 Q 」情報に基づいて、どのように医療アトラスを変換するかについての決定を為す（例えばBellman方程式を解くことにより）ことを可能とされても良い。 Q 情報は、いずれかの20とり得る動作について（将来の）予測される報酬の推定値をRLAが計算することを可能とし得、従ってRLAは、利用可能な変換可能性を最適に利用して、好適な動作選択を為し得る。更に、RLAは、動作の報酬 - 結果を探索し、当該学習された情報を深層ニューラルネットワークに保持しても良い。このために、RLAはまた、深層ニューラルネットワークの更新を管理しても良い。最初に、深層ニューラルネットワークは、ランダム的に初期化されても良いし、又は、以前の画像登録から既に予め保持されていても良い。そのため、該システムにおけるドメイン特有の要素は、

例えば医療画像とこれまでに登録された医療アトラスとの間の差分画像のエネルギーである、報酬関数と、

アトラス、該アトラスのパラメータ化、及び該アトラスの変換動作セットと、30

【 0 0 4 7 】

図4は、医療アトラスの登録を最適化する処理を示す。ここで、医療画像320（図4において「画像」と示される）並びに医療アトラス300及び付随する画像モデル310が、入力として用いられる。特に、医療アトラス300及び付随する画像モデル310は、モデルのパラメータセット P （「アトラス（ P ）」と示される）により変換されている限り利用され、該セットは、これまでに適用された変換動作を表しても良い。医療画像320と医療モデル310との間の差分が決定され、差分画像（「差分画像」と示される）を導出しても良い。次いで、差分画像のエネルギーが、エネルギー関数（「エネルギー（差分画像）」と示される）によって決定されても良く、該エネルギーは、医療画像32040とこれまでに登録された画像モデル310との間の mismatches の度合いの定量化を表しても良い。事実上、差分画像のエネルギーの最小化が、報酬を表し得る。強化学習は、例えば差分画像のエネルギーの最小化を与えるもののような、適切に構成された報酬関数を利用しても良い。次いで、モデルのパラメータのセット P が、RLアルゴリズムにより調節されても良い（「 P を調節」と示される）。以上に説明された処理は、差分画像のエネルギーが最小化されるまで繰り返されても良い。図5は、医療画像におけるアトラス登録を可能とするための方法200を示す。方法200は、必須ではないが、図1を参照しながら説明されたシステム100の動作に対応しても良いことに留意されたい。

【 0 0 4 8 】

方法200は、「アトラスデータにアクセス」と示された動作において、医療アトラス50

を定義するアトラスデータにアクセスするステップ(210)を有しても良い。方法200は更に、「画像データにアクセス」と示された動作において、医療画像の画像データにアクセスするステップ(220)を有しても良い。方法200は更に、「状態空間を定義」と示された動作において、i)アトラスデータ及びii)画像データから抽出された特徴のセットに基づいて、強化学習アルゴリズムのための状態空間を定義するステップ(230)を有しても良い。方法200は更に、「動作空間を決定」と示された動作において、医療アトラスに適用されるのに利用可能な変換動作のセットに基づいて強化学習アルゴリズムのための動作空間を定義するステップ240を有しても良い。方法200は更に、「RLアルゴリズムを実行」と示された動作において、医療アトラスを医療画像にマッチングさせるためのモデルを学習するため強化学習アルゴリズムを実行するステップ(250)を有しても良く、ここで該学習は、医療アトラスと医療画像との間のマッチングの度合いを定量化する報酬関数に基づくものである。以上の動作は、例えば連続して、同時に、又はこれの組み合わせのような、いずれの適切な順序で実行されても良く、このとき利用可能であれば、例えば入力/出力関係のような、特定の順序が必要とされても良い。

【0049】

方法200は、コンピュータ実装された方法としてコンピュータ上で、専用のハードウェアとして、又はこれらの組み合わせとして、実装されても良い。同様に図6に示されたように、例えば実行可能なコードのようなコンピュータのための命令が、例えば一連の機械読み取り可能な物理的なマーク270及び/又は例えば磁氣的又は光学的な特性又は値のような種々の電氣的な特性又は値を持つ及び/又は一連の要素の形で、コンピュータ読み取り可能な媒体260に保存されても良い。実行可能なコードは持続性の態様又は非持続性の態様で保存されても良い。コンピュータ読み取り可能な媒体の例は、メモリ装置、光学記憶装置、集積回路、サーバ、オンラインソフトウェア等を含む。図6は、光ディスク260を示す。

【0050】

本出願の要約によれば、医療画像におけるアトラス登録を可能とするためのシステム及び方法であって、前記アトラス登録は、医療画像に医療アトラスをマッチングするステップを有する、システム及び方法が提供され得る。該システム及び方法は、該医療画像に該医療アトラスをマッチングするためのモデルを学習するための強化学習アルゴリズムを実行しても良く、該学習は、該医療アトラスと該医療画像との間のマッチングの度合いを定量化する報酬関数に基づくものである。RLアルゴリズムの状態空間は、i)アトラスデータと、ii)画像データと、から抽出された特徴のセットに基づいて決定されても良い。更に、RLアルゴリズムのための動作空間が、該医療アトラスに適用されるために利用可能な変換動作の所定のセットに基づいて決定されても良い。そのため、経験則を用いることなく、又は経験則の限られた利用のみを伴って、医療画像におけるアトラス登録のためのモデルが得られ得る。機械学習ベースの手法を用いることにより、例えば種々のタイプの医療アトラス及び/又は医療画像に対してのような、種々のアトラスマッチング問題に対する解法が利用され得る。

【0051】

医療画像への医療アトラスのマッチングは、医療アトラスに対する医療画像のマッチングをも含むものとして理解されるべきであることは、理解されるであろう。

【0052】

例、実施例又は動作特徴は、限定するものではないと示されたか否かにかかわらず、請求される本発明を限定するものとして理解されるべきではない。

【0053】

本発明は、コンピュータプログラム、特に本発明を実行するように構成された、担体上又は担体中のコンピュータプログラムにも適用されることは、理解されるであろう。該プログラムは、ソースコード、オブジェクトコード、部分的にコンパイルされた形態のようなコード中間ソース及びオブジェクトコード、又は本発明による方法の実装における使用に適した他のいずれかの形態であっても良い。斯かるプログラムは、多くの異なる構造的

10

20

30

40

50

な設計を持ち得ることも理解されるであろう。例えば、本発明による方法又はシステムの機能を実装するプログラムコードは、1つ以上のサブルーチンに分割されても良い。これらサブルーチンに機能を分散させる多くの方法が、当業者には明らかであろう。これらサブルーチンは、1つの実行可能ファイルに合わせて保存され、内蔵型プログラムを形成しても良い。斯かる実行可能ファイルは、例えばプロセッサ命令及び/又はインタプリタ命令（例えばJava（登録商標）インタプリタ命令）のような、コンピュータ実行可能な命令を有しても良い。代替として、これらサブルーチンの1つ以上又は全てが、少なくとも1つの外部のライブラリファイルに保存され、例えば実行時に、静的又は動的にメインプログラムとリンクされても良い。メインプログラムは、これらサブルーチンの少なくとも1つに対する少なくとも1つの呼び出しを含む。また、これらサブルーチンは、互い

10 に対する関数呼び出しを有しても良い。コンピュータプログラムに関連する実施例は、開示された方法の少なくとも1つの処理ステップの各々に対応するコンピュータ実行可能な命令を有する。これら命令はサブルーチンに分割されても良く、及び/又は静的又は動的にリンクされ得る1つ以上のファイルに保存されても良い。コンピュータプログラムに関連する他の実施例は、開示されたシステム及び/又はコンピュータプログラムの少なくとも1つの手段の各々に対応するコンピュータ実行可能な命令を有する。これら命令はサブルーチンに分割されても良く、及び/又は静的又は動的にリンクされ得る1つ以上のファイルに保存されても良い。

【0054】

コンピュータプログラムの担体は、該プログラムを担持することが可能ないずれのエンティティ又は装置であっても良い。例えば、該担体は、例えばCD-ROM若しくは半導体ROMといったROMのような記憶媒体、又は例えばハードディスクのような磁気記録媒体を含んでも良い。更に、該担体は、電気若しくは光ケーブル、無線、又はその他の手段を介して搬送され得る、電気又は光信号のような、送信可能な媒体であっても良い。該プログラムが斯かる信号において実施化される場合には、該担体は斯かるケーブル又はその他の装置若しくは手段により構成されても良い。代替として、該担体は、関連する方法を実行するように又は関連する方法の実行における使用のために構成された、該プログラムが組み込まれた集積回路であっても良い。

20

【0055】

上述の実施例は本発明を限定するものではなく説明するものであって、当業者は添付する請求項の範囲から逸脱することなく多くの代替実施例を設計することが可能であろうことは留意されるべきである。請求項において、括弧に挟まれたいずれの参照記号も、請求の範囲を限定するものとして解釈されるべきではない。動詞「有する（comprise）」及びその語形変化の使用は、請求項に記載されたもの以外の要素又はステップの存在を除外するものではない。要素に先行する冠詞「1つの（a又はan）」は、複数の斯かる要素の存在を除外するものではない。本発明は、幾つかの別個の要素を有するハードウェアによって、及び適切にプログラムされたコンピュータによって実装されても良い。幾つかの手段を列記した装置請求項において、これら手段の幾つかは同一のハードウェアのアイテムによって実施化されても良い。特定の手段が相互に異なる従属請求項に列挙されているという単なる事実は、これら手段の組み合わせが有利に利用されることができないことを示す

30

40

【符号の説明】

【0056】

- 020 アトラスデータ保存部
- 022 医療アトラスを定義するアトラスデータ
- 040 画像データ保存部
- 042 医療画像の画像データ
- 062 モデルを表すモデルデータ
- 100 アトラス登録を可能とするためのシステム
- 120 第1の入力インタフェース

- 1 4 0 第 2 の入力インタフェース
- 1 6 0 プロセッサ
- 2 0 0 アトラス登録を可能とするための方法
- 2 1 0 アトラスデータにアクセスする
- 2 2 0 画像データにアクセスする
- 2 3 0 状態空間を決定する
- 2 4 0 動作空間を決定する
- 2 5 0 R L アルゴリズムを実行する
- 2 6 0 コンピュータ読み取り可能な媒体
- 2 7 0 持続性データとして保存された命令
- 3 0 0 (未登録の)医療アトラス
- 3 0 2 登録された医療アトラス
- 3 1 0 医療アトラスの画像モデル
- 3 2 0 医療画像

10

【要約】

医療画像におけるアトラス登録を可能とするためのシステム及び方法であって、前記アトラス登録は、医療画像 3 2 0 に医療アトラス 3 0 0、3 0 2 をマッチングするステップを有する、システム及び方法が提供される。該システム及び方法は、該医療画像に該医療アトラスをマッチングするためのモデルを学習するための強化学習アルゴリズムを実行しても良く、該学習は、該医療アトラスと該医療画像との間のマッチングの度合いを定量化する報酬関数に基づくものである。R L アルゴリズムの状態空間は、i) アトラスデータと、ii) 画像データと、から抽出された特徴のセットに基づいて決定されても良い。そのため、経験則を用いることなく、又は経験則の限られた利用のみを伴って、医療画像におけるアトラス登録のためのモデルが得られ得る。機械学習ベースの手法を用いることにより、例えば種々のタイプの医療アトラス及び/又は医療画像に対してのような、種々のアトラスマッチング問題に対する解法が利用され得る。

20

【 図 1 】

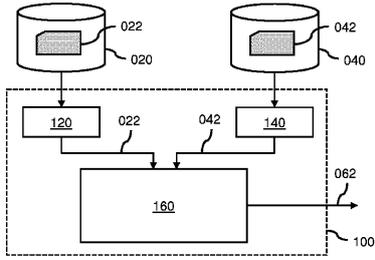


Fig. 1

【 図 2 B 】

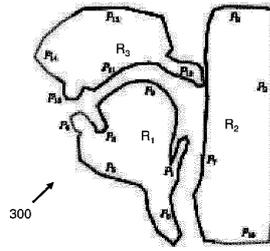
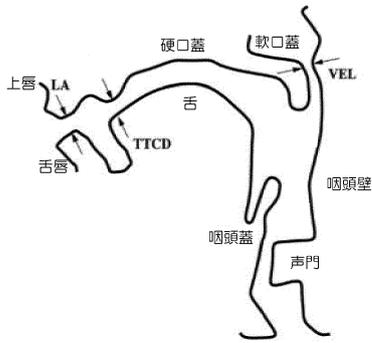


Fig. 2B

【 図 2 A 】



【 図 2 C 】

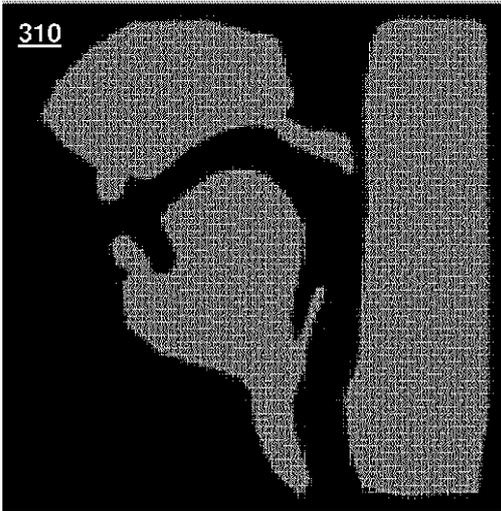


Fig. 2C

【 図 3 A 】

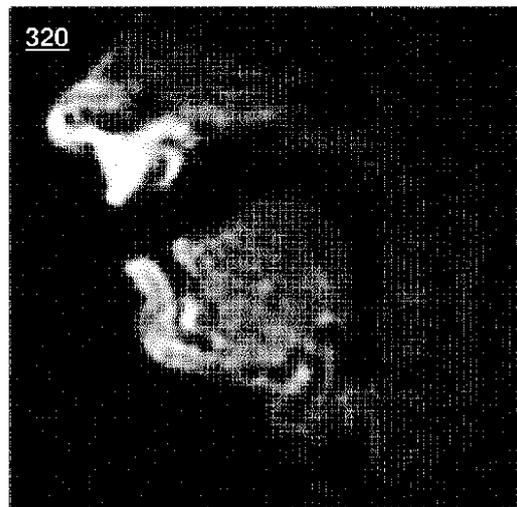


Fig. 3A

【 図 3 B 】

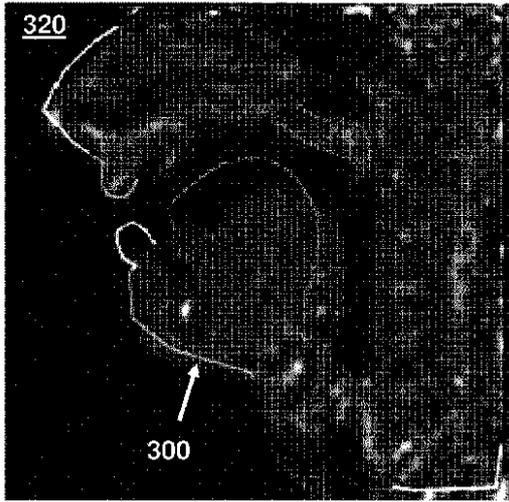


Fig. 3B

【 図 3 C 】

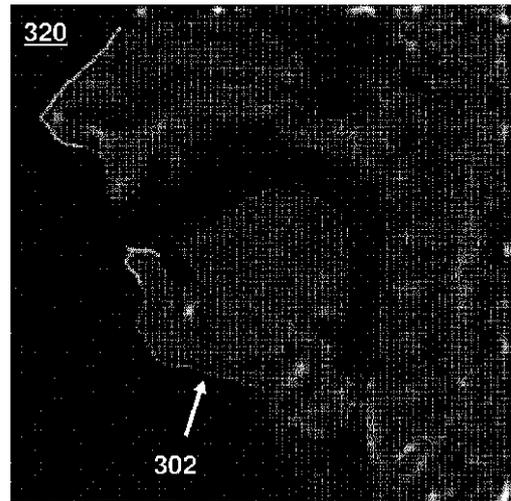
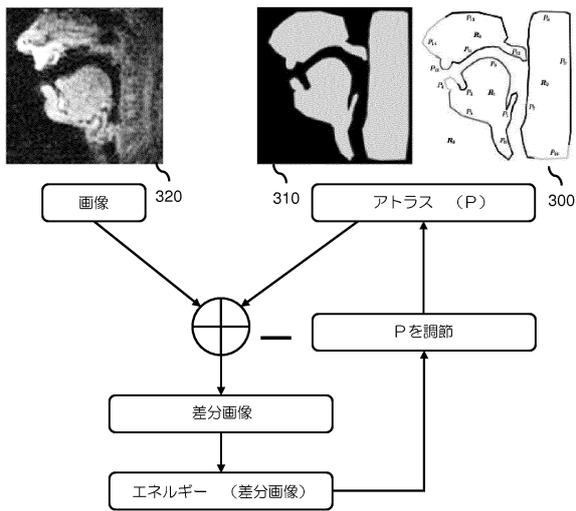


Fig. 3C

【 図 4 】



【 図 5 】

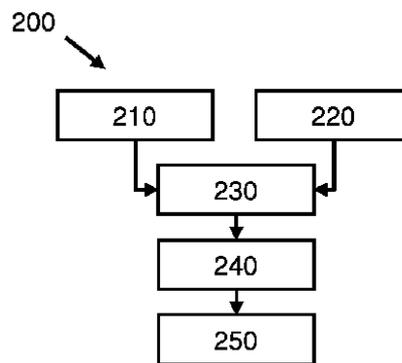


Fig. 5

【 図 6 】

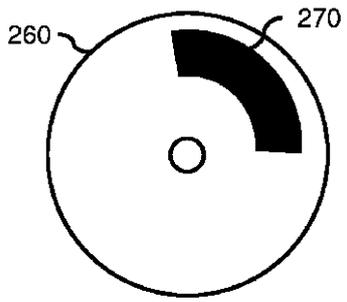


Fig. 6

フロントページの続き

(74)代理人 100145654

弁理士 矢ヶ部 喜行

(72)発明者 ブレス エリク

オランダ国 5 6 5 6 アーエー アインドーフエン ハイ テック キャンパス 5

(72)発明者 メンコヴスキ ヴラド

オランダ国 5 6 5 6 アーエー アインドーフエン ハイ テック キャンパス 5

審査官 亀澤 智博

(56)参考文献 特開2016-041245(JP,A)

特開2015-130973(JP,A)

特表2013-501290(JP,A)

特開2007-283108(JP,A)

特開2004-188201(JP,A)

特開2001-092924(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

A 6 1 B 6 / 0 0 - 6 / 1 4

A 6 1 B 5 / 0 5 5

G 0 6 T 1 / 0 0