

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5442993号

(P5442993)

(45) 発行日 平成26年3月19日(2014.3.19)

(24) 登録日 平成25年12月27日(2013.12.27)

(51) Int.Cl.

F I

A 6 1 B 1/00 (2006.01)

A 6 1 B 1/00 3 2 0 Z

A 6 1 B 1/267 (2006.01)

A 6 1 B 1/26

A 6 1 B 1/273 (2006.01)

A 6 1 B 19/00 5 0 2

A 6 1 B 19/00 (2006.01)

請求項の数 15 (全 45 頁)

(21) 出願番号 特願2008-535158 (P2008-535158)
 (86) (22) 出願日 平成18年10月6日(2006.10.6)
 (65) 公表番号 特表2009-511155 (P2009-511155A)
 (43) 公表日 平成21年3月19日(2009.3.19)
 (86) 国際出願番号 PCT/IB2006/053672
 (87) 国際公開番号 W02007/042986
 (87) 国際公開日 平成19年4月19日(2007.4.19)
 審査請求日 平成21年10月5日(2009.10.5)
 (31) 優先権主張番号 60/725,185
 (32) 優先日 平成17年10月11日(2005.10.11)
 (33) 優先権主張国 米国 (US)

(73) 特許権者 590000248
 コーニンクレッカ フィリップス エヌ
 ヴェ
 オランダ国 5 6 5 6 アーエー アイン
 ドーフェン ハイテック キャンパス 5
 (74) 代理人 100070150
 弁理士 伊東 忠彦
 (74) 代理人 100091214
 弁理士 大貫 進介
 (74) 代理人 100107766
 弁理士 伊東 忠重

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 3D器具経路計画立案、シミュレーションおよび制御システム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

方向付け可能な先端をもつ物理的な器具のための少なくとも一つの経路を決定するシステムであって、前記物理的な器具の制御される自由度は前記物理的な器具の全自由度より少なく、当該システムは：

複数のノードの物理的な姿勢情報を記憶するメモリであって、各ノードは物理的なタスク空間中の異なる離散位置にあり、前記複数のノードは少なくとも一つのゴール・ノードを含んでおり、該ゴール・ノードは、前記物理的な器具の前記方向付け可能な先端が該ゴール・ノードに位置されるときの前記物理的な器具の前記方向付け可能な先端の所望の物理的なゴール姿勢に対応するものである、メモリと；

10

物理的タスク空間ノードの少なくとも一つの近傍ノードを含む、物理的タスク空間ノードの近傍であって、前記物理的タスク空間ノードと近傍ノードとの間に少なくとも一つの許容される遷移方向がある、近傍を生成し、前記メモリ中に記憶する近傍生成モジュールと；

前記物理的タスク空間ノードから前記少なくとも一つの生成された近傍ノードまでの前記少なくとも一つの許容される遷移方向に沿ったコストを計算し、前記メモリ中に記憶する遷移コスト計算モジュールと；

前記少なくとも一つのゴール・ノードから少なくとも一つの計算されたコスト波を伝搬させ、前記方向付け可能な先端の、前記物理的タスク空間ノードに対応する物理的な姿勢から前記物理的ゴール姿勢までの物理的な最小コスト経路に対応するコスト値および遷移

20

方向を各物理的タスク空間ノードに割り当て、前記メモリに記憶するコスト波伝搬モジュールと；

前記物理的な最小コスト経路に沿った物理的タスク空間ノードの系列を含む経路であって、スタート位置における前記物理的な器具の前記方向付け可能な先端の物理的な自然な／静止した姿勢に対応する、物理的タスク空間ノードを含むスタート姿勢で始まり、そこから前記許容される遷移方向に前記物理的な最小コスト経路を、前記スタート・ノードから該経路の一連のノード、前記ゴール・ノードへとたどる経路の決定および同定のための経路決定モジュール、

とを有するシステム。

【請求項 2】

10

前記物理的な器具の前記方向付け可能な先端がさらに、前記スタート位置における静止姿勢から前記ゴール・ノードにおけるゴール姿勢まで前記系列中の各物理的タスク空間ノードの姿勢をとりながら、前記系列の物理的タスク空間ノード間を逐次遷移していくことにより、前記メモリに記憶されている前記決定された経路をたどるよう構成されている、請求項 1 記載のシステム。

【請求項 3】

前記近傍生成モジュールがさらに：前記少なくとも一つの近傍ノードが、3つの位置の値および3つの配向の値を含む6つの次元を有し、

前記少なくとも一つの近傍ノードが、前記メモリ中に、あるノードから該近傍ノードへの前記3つの位置の値および3つの配向の変化として記憶されるよう構成されている、請求項 1 記載のシステム。

20

【請求項 4】

物理的タスク空間ノードの前記系列を、前記メモリ中に記憶された物理的経路に沿った前記器具の動きとしてシミュレートするようさらに構成されており、各ノードは前記器具の方向付け可能な先端の姿勢である、請求項 1 記載のシステム。

【請求項 5】

シード・ノードがスタート・ノードである、請求項 1 記載のシステム。

【請求項 6】

シード・ノードがゴール・ノードである、請求項 1 記載のシステム。

【請求項 7】

30

前記器具がカテーテルであり；

物理的タスク空間ノードの前記系列が、患者の形態論から導出される血管位置の系列に対応する、

請求項 1 記載のシステム。

【請求項 8】

前記器具が、内視鏡、気管支鏡、カテーテル、心臓アブレーション・カテーテルおよびベベルのある針からなる群から選択されるものであり；

物理的タスク空間ノードの前記系列が、患者の形態論から導出される通路位置の系列に対応する、

請求項 1 記載のシステム。

40

【請求項 9】

当該システムがさらに、前記系列を前記器具を操作する介入者に伝送する手段を有する、請求項 1 記載のシステム。

【請求項 10】

当該システムがさらに、前記系列を前記器具を自動操作する自動化コントローラに伝送する手段を有する、請求項 1 記載のシステム。

【請求項 11】

方向付け可能な先端をもつ物理的な器具のための物理的な最小コスト経路を計画する装置であって、前記物理的な器具の制御される自由度は前記物理的な器具の全自由度より少なく、当該装置は：

50

前記物理的な器具の方向付け可能な先端の位置を取り囲む物理的なタスク空間の離散化されたデータ構造表現を具現する情報を記憶する少なくとも一つのコンピュータ可読記憶媒体であって、前記物理的なタスク空間内で前記方向付け可能な先端がとることのできる姿勢を含んでおり、該姿勢は、前記物理的なタスク空間における3つの位置の値および3つの配向として表現され、そのそれぞれの到達可能な隣接者を、到達可能な隣接者への遷移に必要なとされる前記方向付け可能な先端の3つの位置の値および3つの配向の変化を含む変化として表現する、媒体と；

前記物理的なタスク空間での前記方向付け可能な先端の所与の位置の少なくとも一つの隣接位置に、前記離散化されたデータ構造表現内での位置に従って変わる指標に基づいて、前記物理的なタスク空間の少なくとも一つの物理的側面に対応するコストを割り当て、それにより前記少なくとも一つの隣接位置から前記所与の位置へのコストが確立されるようにする手段と；

あるスタート位置で前記割り当てる手段をスタートさせる手段と；

前記割り当てる手段に反復させて、あるゴール位置からシード位置に向かって伝搬する波において、前記離散化された表現内のすべての到達可能な位置がそれぞれのコストを割り当てられるようにする手段と；

前記の割り当てられたコストに基づいて、前記離散化された表現内の前記スタート位置と前記ゴール位置との間の最小コスト経路を同定する手段とを有する装置。

【請求項 1 2】

少なくとも一つのデジタル・データ処理ユニットおよび該少なくとも一つのデジタル・データ処理ユニットに含まれるかこれと結合された少なくとも一つのコンピュータ可読記憶媒体において実行される、方向付け可能な先端をもつ物理的な器具のための少なくとも一つの物理的な動き指定を決定する方法であって、前記物理的な器具の制御される自由度は前記物理的な器具の全自由度より少なく、当該方法は：

前記少なくとも一つのコンピュータ可読記憶媒体において、物理的な現実における前記方向付け可能な先端を取り囲む物理的なタスク空間を表現する配位空間データ構造を具現するステップであって、前記配位空間データ構造は、前記物理的なタスク空間において前記方向付け可能な先端の姿勢を3つの位置の値および3つの配向として表現する情報を含み、その到達可能な隣接者それぞれにおいて姿勢を、到達可能な隣接者への遷移に必要なとされる前記方向付け可能な先端の3つの位置の値および3つの配向の変化を含む姿勢の変化として表現する、ステップと、

配位空間データ構造中でコスト波を伝搬させ、前記スタートとゴールとの間で配位空間データ構造の一部を、空間変化するメトリックに従って、前記方向付け可能な先端の物理的な動きに関する前記物理的なタスク空間の物理的諸側面を表すコスト値で埋めるステップとを有する、方法。

【請求項 1 3】

波を伝搬させる前記ステップがさらに、A*アルゴリズムのヒューリスティックによってガイドされるステップをさらに有する、請求項 1 2 記載の方法。

【請求項 1 4】

前記コスト値を使って前記配位空間データ構造内での方向付け可能な先端姿勢表現の系列を導出するステップであって、該表現は前記物理的なタスク空間においてスタート姿勢からゴール姿勢までの最小コスト経路を定義する物理的な姿勢を表すものである、ステップと；

前記器具が前記経路をたどるために使用可能な電子的な形で前記系列を提供するステップとをさらに有する、
請求項 1 2 記載の方法。

【請求項 1 5】

当該方法がさらに、前記方向付け可能な先端が前記最小コスト経路をたどるよう、自動制御および介入者からの入力のうち少なくとも一によって前記方向付け可能な先端の制御を決定するステップを有する、請求項 1 4 記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、患者内での器具経路の計画立案のためのシステム、装置および方法に関する。

【背景技術】

【0002】

カテーテルは、バルーン血管形成、ステント使用および腫瘍切除のための他のデバイスを位置させるために使用される。今日、カテーテルは視覚的フィードバックを使って操作され、視覚的フィードバックはしばしば、X線透視法（fluoroscopy）とも呼ばれる「ライブX線」による。

10

【0003】

カテーテルは多くの形および大きさがあり、柔軟性もさまざまである。それらは、当該手順のために、外科医の判断に基づいて、あるいは時には手順のための統計的な標準に基づいて選ばれる。

【0004】

Navicath Corporationに譲渡された“Remote control catheterization”と題する米国特許第6,726,675号は、自動的にカテーテルを前に送り出し、また回転させる、カテーテルの自動化された制御を可能にするシステムを開示している。

20

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

カテーテルの手動制御では、実践、器用さ、X線透視法（投影）に基づいて位置を解釈する能力および高価な専門家の時間が要求される。さらに、形態的データに基づく患者固有のシミュレーションがすぐ利用可能ではない。カテーテルの選択は、患者の形態ではなく、外科医の経験および統計的な標準に基づいて実行される。これは、いくつかの手順では、無用な遅延および複雑化につながりうる。

【0006】

肺CTについては、カテーテルの先端の位置および配向を表すために必要とされる約 3×10^{12} 個の要素がある。これは60～120テラバイトのRAMであり、今日のコンピュータでは扱えないものとなっている。

30

【0007】

外科医のためのカテーテルの多くの選択肢があるが、患者固有の形態ではなく統計的標準に基づいて選択されることがある。この非最適な選択は、手順を遅くし、患者へのリスクを増すことがありうる。

【0008】

スコープ技術に関し、今日、肺の深領域を検査するためには気管支鏡が使われ、腹腔鏡検査などで胃腸管の一端から、あるいは小さな切開を通じて自然の体腔にはいるためには内視鏡が使われる。スコープは目視検査、しばしば生検を通じた診断のために、また光線力学的療法のような何らかの形の療法を届けるために操作される。

40

【0009】

気管支鏡の手動制御では、実践、慎重な手動制御および高価な専門家の時間が必要とされる。さらに、患者固有のシミュレーションがすぐ利用可能ではない。

【0010】

ロボット制御またはビークル（vehicle）制御のために使われる諸技法が、カテーテルおよびスコープの制御に、非自明な形で適用可能である。当技術分野での配位空間は、特に、器具の可能な状態を表すあらゆる姿勢の集合と考えられる。気管支鏡については、これは3D位置および3D配向を含む6次元問題である。

【0011】

肺CTについては、約 $512 \times 512 \times 240$ （X×Y×スライス）すなわち62,914,560個の位置が

50

ある。角度は、 rX 、 rY および rZ （ロール、ピッチ、ヨーとも呼ばれる）においてそれぞれ10度で粗く離散化されることができる。この粗い離散化でさえ、配位空間は：

$$512 \times 512 \times 240 \times 36 \times 36 \times 36 = 2,935,341,711,360 \text{個の要素（約 } 3 \times 10^{12} \text{ 個）}$$

を必要とする。各要素は20ないし30バイト含んでいるので、これは配位空間のためだけに60～120テラバイトということである。これは、最速アクセスのために理想的にはRAMに記憶される。今日のコンピュータにとっての記憶要件は、これだけでも困難な仕事となる。

【課題を解決するための手段】

【0012】

本発明のシステム、装置および方法は、6自由度から3自由度への配位の縮小を、位置を状態として使い、現在状態での配向設定を提供する r （ロール）、 p （ピッチ）、 w （ヨー）角を記憶することによって、およびカテーテルおよびスコープの先端の任意の向きからの運動学的に正しい角を維持するために使われる近傍を生成することによって、行う。これは、前記計算を今日のシステムで扱えるようにし、明日のコンピューティング・システムでは常により速くする。結果として得られる経路は運動学的に正しく（すなわち、所与の器具で達成可能）、無衝突で、離散化された空間において最適である。この方法を使って、生検のために気管支鏡が肺を通して目標位置に進むための計画が生成され、血管を通るカテーテル動きのための計画が達成される。

【0013】

本発明の諸実施形態は、L. DorstおよびK. Trovatoへの米国特許第6,604,005号およびK. TrovatoおよびL. Dorstへの1999年2月9日の米国特許第5,870,303号“Method and apparatus for controlling maneuvers of a vehicle”に記載されている経路計画立案技術の非自明な変形である。

【0014】

カテーテルについては、近傍とは、カテーテルが行うことのできるあらゆる動きを含む。あらゆる動きとは、挿入（前進運動）、左右の曲がり（回転）を含み、さまざまな曲がりおよびカテーテル回転に従うことによって誘起されるひずみによって重み付けされたコストをもつ。

【0015】

スコープについては、近傍とは、「スコープ」が行うことのできるあらゆる動きを含む。あらゆる動きとは、挿入（前進運動）、各方向で異なることもある所与の最大回転半径についての左右の曲がり（回転）であり、進んだ距離に基づくコストをもつ。

【0016】

従来の業績からの主たる相違としては次のことが含まれる：

- ・あらゆる器具について：結果として得られる配向を3D空間内に保存することによる、3D配位空間での6D。
- ・カテーテル、気管支鏡およびベベルのある針が自動車のように、すなわち非ホロノミー的に振る舞う。
- ・近傍が異なる：自動車のように単一面ではなく多くの配向におけるスレッドをもつ3Dを有する。
- ・気管支鏡制御は自動車制御とは異なる：上／下、左／右、前ならびにあらゆる組み合わせおよびグラデーションを含む。
- ・カテーテル制御は自動車制御とは異なる：カテーテルはアルファ回転および前進のみをもつ。
- ・ベベルのある針の制御は自動車制御とは異なる：単一の「回転半径」をもつが、針の回転は、種々の方向に外れることを許容できる。一方、従来技術が教示するのは二次元環境すなわち平面内での曲がりである。制御は0または180度における針についてのみだったからである。

【発明を実施するための最良の形態】

【0017】

以下の記述が例示の目的のために与えられるものであり、限定するためでないことは当

10

20

30

40

50

業者は理解するはずである。当業者は、本発明の精神および付属の特許請求の範囲内にはいる数多くの変形が存在することを理解する。既知の機能および動作の無用な詳細は、本発明をかすませることがないよう、本記載から省かれることがある。

【0018】

器具 (tool) または「自律システム」のための経路計画立案 (Path Planning) は、K. I. Trovato, “A* Planning in Discrete Configuration Spaces of Autonomous System”, University of Amsterdam, 1996によって教示される枠組みを使って実行できる。該枠組みの各構成要素について以下に述べる。ひとたび構成要素が知られば、それらは経路を生成するためのコスト波伝搬法内で使われることができる。次いで、気管支鏡、カテーテルおよびベベルのある針について、該枠組みの必須要素について述べる。

10

【0019】

〈枠組み〉

配位空間／システム・ステータス (status)

器具または自律システムは、離散化された形で記述できねばならない。すなわち、器具は、主要属性 (またはパラメータ) によって特徴付けられ、各属性は一つまたは複数の有効な離散値の範囲をもつ。したがって、器具ステータスは、これらの属性のそれぞれについて一意的なセッティングを提供する。あらゆる可能なパラメータ範囲のスパンは、配位空間 (configuration space) と呼ばれ、CSと略記される。時に、配位空間は、その中でアクションが実行される「タスク空間」または環境に一致する

20

ノード／状態 (state) ／イベント／遷移

離散化された空間なので、器具のステータスまたは「姿勢 (pose)」は、グラフの「ノード」と考えることができる。さらに、システム内での、あるシステム状態 (state) と別のシステム状態との間の変化を引き起こすことのできる任意のイベントは、ノード間の「遷移」と見ることができる。

【0020】

基準／コスト

器具の目的は、しばしば、最速、最短、最安価などといった成功の基準をもつ。多くの場合、これは、ノード間でのある特定の遷移について被られるコストに直接変換されることができる。ノード、遷移およびコストのセットは、配位空間のグラフをなすことができる。

30

【0021】

原子的なアクション／近傍／後継者 (successor)

ある範囲内で配位空間でのある状態から別の状態への変化または遷移を引き起こす許容される原子的なアクションは、「近傍 (neighborhood)」としてカプセル化される。この近傍は、可能な後継者の集まりである。許されうる後継者は、ある種の動きをするための器具のコア機能を表す。これは通例、位置によっては変わらないので、効率のため、近傍は一度定義して任意の元の状態に関して使用することができる。近傍者 (neighbor) はまた、「ゲーム規則」に基づいて決定されてもよい。それにより、制御される器具の特定の属性によって選択される若干の近傍者がありうる。

40

【0022】

各遷移には、ある元の状態と近傍者状態との間で変化するために課されるコストが割り当てられている。したがって、配位空間における状態と、状態間の遷移との組み合わせは、状態をノードとし、許されうる遷移を有向エッジとするグラフと考えることができる。

【0023】

制約／禁止領域／障害物

多くの応用について、器具は制約をもつ。制約とは、不正な器具状態を定義する。それはしばしば、機械的な限界、環境 (すなわち障害物) との相互作用または課されている規則のためである。これらは、配位空間内のノードの禁止領域に変換されなければならない。いくつかのグラフでは、これらのノードへの遷移は、それらのノード自身とともに除去

50

される。あるいはまた、それらのノードが不正とマークされてもよいし、あるいは該ノードへの遷移が ∞ と記される無限大の（達成不能で高い）コストを有していてもよい。これらの技法のそれぞれは、探索時に制約されたノードを回避させる。

【0024】

「ゴール」／「スタート」

器具「ゴール」位置は、離散化された配位空間における一つまたは複数の等価な「ゴール」ノードにマッピングされうる。システムを表現するパラメータの定式化が、システム「ゴール」を記述する二つ以上の解をもつことがありうるので、複数の「ゴール」ノードが存在しうる。（たとえば、左手の配位の腕でも右手の配位の腕でも同じ位置に到達できる。）システム「スタート」は、単に特定の「スタート」ノードに変換される。

10

【0025】

一連のイベント／最適経路

現在システム・ノードから所望される「ゴール」まで導く最も望ましい一連のイベントを見出すことは、すべての不正ノードを回避しつつ被るコストが最小の、現在ノードから「ゴール」ノードまでの遷移の最適経路を見出すことと類似である。したがって、望ましい一連のイベントは、配位空間ノード、遷移、コスト、禁止領域および「ゴール」を使って経路を計画立案することによって、および「スタート」ノードを知ることによって見出すことができる。A*のようなグラフ探索法が、経路を決定するための効率的な機構を提供する。ひとたび構成要素がしかるべき位置に来たら（in place）、解を計算するためにA*アルゴリズムを使うことができる。

20

【0026】

〈気管支鏡の実施形態（B）〉

図1は気管支鏡を示している。好ましい実施形態では、気管支鏡は以下の枠組み構成要素をもつ。

【0027】

B. 1 配位空間

ある好ましい実施形態では、気管支鏡の配位空間は、図2に示されるような3空間における気管支鏡の先端の位置として表される。先端の配向は、それぞれアルファ201、シータ202およびファイ203と呼ばれる、X軸、Y軸およびZ軸のまわりの回転で記述される。それぞれの角について正の方向があり、それぞれの角について負の方向がある。我々の例は、軸および関連する配向を同定するのに標準的な「右手則」系を使うが、他の系を使うこともできる。「スタート」、「ゴール」および進行の許されうる領域は、CT、MRIまたは3D超音波（3D電子または合成）を使って撮像され、配位空間の大きさを測る基礎として使用されることができる。先端はまた、3つの追加的な角を必要とする配向をもつ。図2参照。従来技術では、それぞれの角は、3つの位置および配向のそれぞれにおいて離散化される必要があり、6次元問題を生成するところである。この空間内で経路が計算できるが、これはただでさえ大きなデータセットをずっと大きくしてしまう。

30

【0028】

配位空間の概念は、器具の姿勢を特徴付けるすべてのパラメータをスパンする定義につながり、それにより巨大な配位空間につながる。たとえば、 512×512 ピクセルおよび295スライスをもち、2つの配向のそれぞれについて360個の可能な離散化された角をもつ肺画像は、

40

$512 \times 512 \times 295 \times 360 \times 360$ すなわち10,022,289,408,000個の状態

というボリュームになる。3つの配向の場合、ボリュームは

$512 \times 512 \times 295 \times 360 \times 360 \times 360$ 個の状態すなわち3,608,024,186,880,000個

となる。より粗い離散化は配向の集合を縮小するが、誤差を加える。さらに、これらの超大ボリュームのデータは、多くの現行のコンピューティング機能を超えている。

【0029】

現行の32ビット・ハードウェアおよびオペレーティング・システムは、プロセス当たりのRAMを2ギガバイトに制限しており、メモリの限界が医療撮像のための深刻な問題となっ

50

ている。64ビット・ハードウェアおよびオペレーティング・システムはそうした困難のいくらかを緩和するが、空間を縮小する方法は有用であり続けるであろう。

【0030】

B. 2 配位空間の最小化

このみかけの「6D」問題をより扱いやすい大きさに変換するために、いくつかの観察を述べておく：

配位空間内のいかなる特定の経路に沿っても、最適である器具先端の配向は一つしかない。したがって、それぞれの位置配位状態（すなわち、 x, y, z ）において一つだけのオプションを記憶するのが十分であることができる。これは問題を3次元に変換し、必要とされるのは（CT体積）のオーダーの記憶である。これは、配位空間の大きさを劇的に、4660万（ $360 \times 360 \times 360$ ）倍以上も縮小する。

10

【0031】

さらに、以前には要求される角を離散化することではなく、配位空間において記憶される値は、整数、浮動小数点数または倍精度数であることができ、任意に精密な角を表すことができる。角の離散化誤差はこのようにして大幅に小さくできる。

【0032】

最後に、6次元計画立案は、名目近傍の計算にカプセル化できる。これは計算オーバーヘッドをさらに減らすことができる。

【0033】

この体積の縮小が可能なのは、角が、独立な状態を要求しない二つの目的に使われるからである。

20

【0034】

1) 空間の逐次的な拡張を向き付けるのを助けるための x, y, z 位置内での特性として；および

2) 経路がたどられる際に制御パラメータの決定因（determinant）として。

【0035】

B. 3 ノードと遷移

配位空間内の各位置において、ノード・データ構造が主要な情報を保持する。下記は、気管支鏡のための配位の好ましい空間ノード・データ構造である：

```
float  cost_to_goal;
struct csnode *best_parent_ptr;
unsigned int  heap_location; // ヒープ(tree[i])へのインデックス
float  alpha,  theta,  phi; //  x,y,zのまわりの回転
short  thread_number; //  任意的。半径および配向を推定。
```

30

ここで、

・cost_to_goalは、現在ノードから最も近い「ゴール」までのコストの値を記憶し、A*（または差分A*）法が空間を再計算したときに更新される。

・best_parent_pointerは、潜在的な近隣者の数が32または64を超え、アドレスを直接記憶するほうがスペース効率がよくなることがあるので、一つの「等価な」親をポイントし、ある好ましい実施形態では、最初の低コストの親へのポインタである。

40

【0036】

ヒープは、好ましい実施形態では、まだ拡張されるべきノードを追跡するために使われる。これは配位空間とは異なる記憶構造である。探索の間にコストが素早く増減しうる環境においてヒープ中の値の変更を管理するために、配位空間とヒープとの間の位置リンクが含まれる。ヒープは配位空間ノードへのリンクを有し、配位空間はヒープへの戻りリンクを有する。これらのリンクは、ヒープが調整されると更新される。

【0037】

ある代替的な実施形態では、配位空間は、親ノードから（現在の）隣接者ノードに進むために使われるスレッドの番号を含む。このスレッドから、現在ノードの半径および配向が決定され、デバイスを制御するために使われることができる。これは、実際に経路をた

50

どる間のこの値の再計算をなくす。しかしながら、リアルタイム制御の状況では、計画と呼吸や体の動きを含むライブ環境との間の差を埋め合わせるために弧がわずかに変化できるなら、スレッドの「オンザフライ」再計算が望ましいことがありうる。

【0038】

経路が存在しない可能性があるので、経路が存在するかどうかを判定するために所定のアルゴリズムが使われる。経路が存在すれば、アルゴリズムは、ノードnからシード・ノード（しばしばゴール）までの一連のノードを生成する。そのようなアルゴリズムの一例は：

```

follow_path_from (n)
{
    if(best_parent != NULL) // 経路が存在
        While (n != seed) // まだ未到達
        {
            append_to_path(n)
            n=n.best_parent // 一連のうち次のノードまでたどる
        }
    if(n==seed) // シードに到達またはシードからスタート
        append_to_path(n)
    else // best_parentがヌルだった、すなわちnからシードまでの経路が存在しなかつた
        printf("nからシードまでの経路なし");
}

```

B. 4 基準／コスト

気管支鏡の実施形態については、気管支鏡先端の最小距離が最適化の基準となるであろう。したがって、先端が進む距離が、「回転半径」によって定義される曲率（まっすぐか曲がっているか）によって打たれる弧によって測定される。これは、次のセクション内の各名目近傍者について計算される。他の基準が使われてもよいことは明らかである。たとえば、より安全な経路を奨励するために、気管支の境界近くでは重み付けされているものなどである。

【0039】

B. 5 原子的なアクション／近傍／後継者

気管支鏡の先端はいくつかの基本的機能がある。まっすぐにセットされ、右／左に曲がり、上／下に曲がることのできるものである。気管支鏡が進むにつれて、のちのスコープ本体が先端によって設定された経路をたどる。ここで図3を参照すると、近傍の一部が図示されている。小さな単位方向（たとえばX）301に沿った可能なまっすぐの動きの集合を示している。直線301を含むそれぞれの弧はスレッドと呼ばれる。スレッドの概念は、訪問可能な点の優先を表す。換言すれば、ホーム位置からより遠い点は、途中の点が遮られる（たとえばコストが無限大になる）と到達できない。Y方向に掃引する生成された弧も計算され、302で示されている。弧は、約90度掃引して、指定された回転半径をもつ円になる。90度が要求される最大である。したがって、近傍者の数は半径の大きさに関係している。すなわち、より大きな半径は、完全な90度の弧をカバーするために、より多くの近傍者を必要とするのである。

【0040】

次いでこの弧は、均一に分散してXのまわりに任意の度数、回転させられる。したがって、スレッド番号は特定の回転半径（角が直線なら無限大）および現在の配向に対するXのまわりの回転を含意する。

【0041】

気管支鏡の基本機能を記述する名目近傍についてのデータ点および値の例が図4に示されている。この名目近傍（nominal neighborhood）は、各近傍者について、デフォルト（すなわち、アルファ、シータおよびファイが(0,0,0)の配向）からの、X、YおよびZでの

相対位置を同定するものである。この近傍についてのデータの例が付録Aに呈示される。

【0042】

論理的な拡張として、ある好ましい実施形態では、3D領域のより大きな体積をカバーするために、近傍は多くの可能な半径を含む。この近傍は、スレッド／光ファイバー・ランプにおけるスレッド群と似た図5の類似の形によって示されるように、3Dで計算されることになる。よって、体積中のあらゆる状態が埋められるべきである。これは本当に類似である。よりきつい回転半径のスレッドはより短く、より長い回転半径のスレッドはより長い。これは実行できるが、経験によれば、極端な制御機能および「まっすぐ」だけが実際に使われることが示されている。したがって、近傍者の数を実際に使われるものに減らすことは、必要とされる計算時間を減らすことになる。コストの指標が距離でなくより複雑な場合、これらの近傍者は本質的になりうる。複雑なメトリックの例は、管（気管支、血管または自由空間）のエッジからの距離を最小化するものでありうる。この場合、精密な曲率がより本質的でありうる。

10

【0043】

名目近傍の線および弧を生成するソフトウェア・コードの例は、図6に与えてある。

【0044】

名目近傍は一度、スタートアップ時に計算されるものとする。

【0045】

B. 6 制約／禁止領域／障害物

本発明への入力、CTなどからのセグメント化された3D画像を含む。これは、組織の自由空間領域（すなわち、動きが許可される領域）および不正領域を定義する。自由空間のノードは「コスト付け未」に設定される。これは、自由に更新されうることを意味する。不正領域は「無限大」という特殊な（高い）値に設定される。これは、その経路が通ってはならないという指示でもある。

20

【0046】

B. 7 「ゴール」／「スタート」

「スタート」および「ゴール」の概念が使用できるいくつかの方法がある。現実には、経路の計算は、いずれの方向にスタートして行なってもよく、任意の方向コストを適正に計算するよう注意を払って行なうことができる。たとえば、一方通行の通りを逆方向に運転することは許されない。

30

【0047】

「ゴール」は、肺の中の腫瘍の3D位置でありうる。腫瘍はその探索のための「シード」ノードとして使われる。気管支鏡の先端まで給送された器具から生検が得られるべき場合などでは、接近の配向は医師によって提案されてもよい。この場合、「スタート」ノードは絶対必須ではない。

【0048】

「スタート」ノードが「シード」ノードであってもよい。「シード」ノードはしばしば気管の概略中心に位置される。この位置は、体積の最初（または最後）のスライス上での大きな黒い丸であるので、肺CT上でグラフィック的に選択することが簡単である。この場合、「ゴール」ノードは絶対必須ではない。

40

【0049】

ノード当たり単一の配向をもつ3D配位空間では、「シード」ノードは、定義された配向を有する必要がある。複数の配向が可能である場合には、計画は、異なる諸配向を使って「シード」ノードから再生成されてもよい。しかしながら、多くの臨床事例では、配向は比較的簡単に定義できる。たとえば、腫瘍は、その表面上のいくつかの点のうちの一つからはいってもよいが、理想的には表面に垂直な配向から採取される。配位空間内での各表面位置は、こうして、理想的な配向を有しうる。

【0050】

B. 8 一連のイベント／最適経路

「シード」ノードがヒープに入れられて、コスト波伝搬 (cost wave propagation)

50

すなわちA*が開始される。ヒープは、ルートのところ最低コスト値を維持する均衡した二分木である。図7の諸ステップが行われる。

【0051】

プロセスは701で始まり、ステップ710に行く。ステップ710では、最低コストのノードがヒープから取られる。ヒープから取られたノードは「ホーム」と呼ばれる。よく知られた諸アルゴリズムを用いてヒープは正しいままであることが保証されているとする。プロセスは731を介してステップ720へと進む。

【0052】

ステップ720では、「停止基準」が試験される。プロセスが停止してもよいかどうかを判定するために実行できる多くの試験がある。「停止基準」はたとえば：

1. ヒープが空

2. 現在（「ホーム」）ノードのcost_to_goal値が（「シード」でない）「スタート」または「ゴール」より大きい。これは、空間全体が埋められる前に探索が終了することを可能にするが、それでも「スタート」と「ゴール」の間の最適経路を与える。

「停止基準」が満たされたら、プロセスはステップ713で矢印711をたどって終了する。「停止基準」が満たされない場合、プロセスは712を介してステップ730に進む。

【0053】

ステップ730では、許されうる動きの近傍が生成される。「ホーム」ノードの近傍者は、そのアルファ、シータおよびファイによって与えられる「ホーム」ノードの配向およびその「ホーム」x,y,z位置に基づいて計算される。近傍は、名目近傍をアルファ、シータおよびファイによって回転させ、回転済みの近傍を「ホーム」ノードのx,y,z位置に対して並進させる結果として得られる。諸点の回転および並進のための方法は当業者には周知であるが、それらの変換を達成するためのソフトウェア・コードの例が図8に与えられている。

【0054】

x:y:zの比がたとえば1:1:1.3であるなどするCT画像におけるようにピクセルが完全に正方形でない場合、回転が実行され、次いで値がスケールリングされる。結果として得られる近傍は次いで、現在の拡張するノードの位置に並進される。ひとたび現在の「ホーム」ノードについての近傍者が計算されると、プロセスは732を介してステップ740に進む。

【0055】

ステップ740では、近傍の次のスレッドが選ばれる。それ以上スレッドがない場合には、プロセスは714を介して710に戻る。スレッド（f）がある場合、プロセスは716を介して750に進む。

【0056】

ステップ750では、スレッド（f）に沿った次の近傍者（n）が選ばれる。このスレッドに沿ってそれ以上の近傍者がいない場合には、プロセスは715を介して740に戻る。もう一つの近傍者（n）がある場合、プロセスは817を介してステップ760に進む。

【0057】

ステップ760では、近傍者のコスト値が試験される。コストが無限大であるか、その近傍者が通行可能でないという他の指標があるかすれば、プロセスは718を介して740に戻る。他の指標とは、近傍者が、無限大よりは小さいが通過するためには高すぎる、何らかの所定の閾値より高いコスト値を有するというものでありうる。この閾値はたとえば、（「ホーム」ノードにて）進んだ現在距離の関数であってもよい。近傍者が無限大のコストを有さない場合、プロセスは719を介してステップ770に進む。

【0058】

ステップ770では、提案される新しいコスト $F(n')$ が前記の新たな近傍者について計算される。該近傍者はすでにコストを有していてもよいので、それは $F(n')$ と記される。A*アルゴリズムでは、ヒューリスティック $h(n)$ が探索を案内（ガイド）するために使用さ

10

20

30

40

50

れうる。しかしながら、ある完全に有効な値は $h=0$ である。これは、「停止基準」が満足される／真になるまで、空間をすべての「シード」ノードから埋めさせる。次いでプロセスは733を介してステップ780に進む。

【0059】

ステップ780では、計算されたコスト $F(n')$ が、 n において前から存在しているコスト $F(n)$ と比較される。 $F(n')$ が $F(n)$ より大きい場合、それは、以前に決定されたのが何であれ、「ホーム」ノードを介して n に到達することはそれよりコスト高であり、プロセスは721を介してステップ750に戻る。計算されたコスト $F(n')$ が $F(n)$ より小さい場合、この値は従来の方向に対して改善になる。この場合、プロセスは722を介して790に進む。

10

【0060】

ステップ790では、前記ノードがヒープに加えられる。それがすでにヒープ上にあれば、値が更新され、ヒープは調整される。新しい $cost_to_goal$ が、新しいアルファ、シータおよびファイと同様、 n に割り当てられる。アルファ、シータおよびファイの値は、名目ノードのアルファ、シータおよびファイの値を親のアルファ、シータおよびファイに加えることによって計算される。「シード」ノードへの最良の道を導く改訂された「best_parent」が「ホーム」に割り当てられる。任意的にだが好ましくは、スレッドの番号が保存される。これは、のちに経路をたどる際の計算を最小化する。というのも、スレッド番号は制御パラメータ、すなわちスコープが上／下および左／右に曲げられる量に直接マッピングするからである。

20

【0061】

B. 9 変形

制御または感知誤差のいずれかがありそうな場合、近傍を、理論的に可能なよりも狭く定義することが好ましい。たとえば、回転半径は可能な最小値よりも大きくされる。これは、手順の間のわずかな過剰修正によって引き起こされる予期しない制御または感知誤差を埋め合わせしうる。

【0062】

気管支鏡は対称的でなくてもよい。すなわち、左、右、上、下方向の曲率半径が等しくなくてもよい。

【0063】

B. 10 経路追跡

図7のステップ713での探索完了後、ある好ましい実施形態では、いくつかのプロセスが生起できる。

30

【0064】

「スタート」および「ゴール」が同定されていれば、経路はレンダリングまたは実施されることができる。それは、セットポイント (setpoint) を器具に送り、進み距離および左右および上下制御のための角度を与えることによる。これらの値は、現在の位置および配向と目標の位置および配向との間の最適弧を計算することによって決定できる。好ましい実施形態では、正しい左右、上下の設定が達成されるよう、スレッド番号 (図7のステップ790からのような) または曲率および角度が保存される。

40

【0065】

ある代替的な実施形態では、「スタート」ノードが「シード」ノードである場合、「ゴール」ノードは、3空間内で到達可能な諸状態を示すことによって医師により「拾われる」。その際、医師は、腫瘍の位置のような目標位置を拾う。あるいはまた、コンピュータ援用検出システムが疑われる病変をサブセットの点としてハイライトし、医師がさらにこのサブセットの点のうちから目標位置を拾う。

【0066】

あるさらなる代替的な実施形態では、「ゴール」ノードが「シード」ノードである場合、気管支鏡はリアルタイムで追跡される。気管支鏡の先端の x 、 y 、 z 位置が、配位空間内の対応する位置を見出すのに使われる。気管支鏡の位置に基づいて、先端の角度が適正

50

な左右、上下角に調節される。

【0067】

例示的な経路が図9に示されている。ここで、半透明な肺状態を通して経路901が示されている。経路が気管支樹のエッジに沿って動くときは、経路とビューとの間に半透明ピクセルがないので、経路901はより明るくなる。

【0068】

気管支鏡は二つのコントロールに加えて患者内に進んでいく能力をもつ。コントロールは一方のダイヤル上の「左、中央、右」および他方のダイヤル上の「上、水平、下」である。「中央」は「左」と「右」の間であり、「水平」は「上」と「下」の間である。進みは、手で実行されるか、あるいは機械で実行されることができる。経路は「スタート」から「ゴール」までたどられ、配位空間から順に各「セットポイント」を読み出す。セットポイントは、現在の位置および配向、次のセットポイントに到達するための進みの量およびスレッド番号を与えるものである。スレッド番号は、次のセットポイントに到達するために気管支鏡がもつべき姿勢を与える。図4では、9つのスレッドがある。一つはまっすぐで、残りは14mmの回転半径の弧を実行している。好ましくは、スレッド番号が保存されるが、制御される姿勢は現在位置から「ゴール」位置および配向まで導く最大半径の弧として計算できる。この「オンザフライ」計算は、制御または患者の動きにおけるリアルタイムの逸脱を管理するためにも有用でありうる。図4に示されるスレッドは、表1の動作に対応する。

【0069】

【表1】

スレッド番号	左右制御	上下制御
410	中央	上
420	右	上
430	右	水平
440	右	下
450	中央	下
460	左	下
470	左	水平
480	左	上
490	中央	水平

表1

〈カテーテルの実施形態（C）〉

カテーテルは、脈管構造内の遠位において動作を実行するために使われる。そのような手順の例は、血管形成および心臓カテーテル法である。心臓手順は、大腿動脈から心臓まで入れられるカテーテルを使う。ただし、時には心臓へのアクセスは腕または手首の動脈を介する。例示的なカテーテルが図10に示されている。カテーテルのもう一つの用途は心臓アブレーション（ablation）のためである。この場合、心臓の不適正な電気経路を選択的にアブレーションすることによって心臓リズムが回復できる。FDAウェブサイト（www.fda.gov）からの図11は、従来技術に基づいて心臓中でどのようにアブレーション・カテーテル1101が使われるかを示している。ここで、カテーテルは画像ガイダンスのもとに手動で制御される。従来技術では心臓カテーテル制御のために利用可能な自動化された制御がないので、心臓血管における適正な位置が達成されるまで手順は何時間もかかることがある。

【0070】

C. 1 配位空間

ある好ましい実施形態では、カテーテルの配位空間は、3空間におけるカテーテルの先端の位置として表される。「スタート」、「ゴール」および進行の許されうる領域は、CT、MRIまたは3D超音波（3D電子または合成）を使って撮像され、配位空間の大きさを測る

基礎として使用されることができる。先端はまた、図2に示されるような3つの追加的な角を必要とする配向をもつ。

【0071】

従来技術では、それぞれの角は、3つの次元のそれぞれにおいて離散化される。この空間内で経路が計算できるが、これはただでさえ大きなデータセットをずっと大きくしてしまう。512×512ピクセルおよび295スライスをもち、3つの配向のそれぞれについて360個の可能な離散化された角をもつ肺画像については、ボリュームは

512×512×295×360×360×360個のノードすなわち3,608,024,186,880,000個のノードとなる。

【0072】

より粗い離散化は配向の集合を縮小するが、誤差を加える。さらに、これらの超大ボリュームのデータは、多くの現行のコンピューティング機能を超えており、現行のハードウェアに関し同じ問題をもつ。

【0073】

C. 2 配位空間の最小化

このみかけの「6D」配位空間問題をより扱いやすい大きさに変換するために、いくつかの観察を述べておく：

配位空間内のいかなる特定の経路に沿っても、最適である器具先端の配向は一つしかない。したがって、それぞれの位置配位状態（すなわち、 x, y, z ）において一つだけのオブションを記憶するのが十分であることができる。これは問題を3次元に変換し、必要とされるのは（CT体積）のオーダーの記憶である。これは、配位空間の大きさを劇的に、4660万（ $360 \times 360 \times 360$ ）倍以上も縮小する。

【0074】

さらに、以前には要求される角を離散化することではなく、配位空間において記憶される値は、整数、浮動小数点数または倍精度数であることができ、任意に精密な角を表すことができる。すると離散化誤差は大幅に小さくできる。

【0075】

最後に、6次元計画立案は、名目近傍の計算にカプセル化できる。これは計算オーバーヘッドをさらに減らす。

【0076】

この体積の縮小が可能なのは、角が、独立な状態を要求しない二つの目的に使われるからである。

【0077】

- 1) 逐次的な拡張を向き付けるのを助けるための x, y, z 位置内での特性として；および
- 2) 経路がたどられる際に制御パラメータの決定因（determinant）として。

【0078】

C. 3 ノードと遷移

気管支鏡の実施形態におけるのと同じように、カテーテルの配位空間内の各位置において、データ構造が必要な情報を保持する。下記は、カテーテルのための好ましい配位空間ノード・データ構造である：

```
float cost_to_goal;
struct csnode *best_parent_ptr;
unsigned int heap_location; // ヒープ(tree[i])へのインデックス
float alpha, theta, phi; // x,y,zのまわりの回転
short neighbor_number; // 任意的。半径および配向を推定できる。
```

これらの変数のそれぞれについて次により詳細に述べる：

・cost_to_goalは、現在ノードから最も近い「ゴール」までのコストの値を記憶し、 A^* （または差分 A^* ）法が空間を再計算したときに更新される。

・best_parent_pointerは、潜在的な近隣者の数が32または64を超え、アドレスを直接記憶するほうがスペース効率がよくなることがあるので、一つの「等価な」親をポイントし

10

20

30

40

50

、ある好ましい実施形態では、最初の低コストの親へのポインタである。

【0079】

ヒープは、好ましい実施形態では、記憶のデータ構造である。探索の間にコストが素早く増減しうる環境においてヒープ中の値の変更を管理するために、配位空間とヒープとの間の位置リンクが含まれる。ヒープは配位空間ノードへのリンクを有し、配位空間はヒープへの戻りリンクを有する。これらのリンクは、ヒープが調整されると更新される。

【0080】

ある代替的な実施形態では、配位空間は、現在ノードから親ノードに進むために使われるスレッドの番号を含む。このスレッドから、現在ノードの半径および配向が決定されることができる。これは、実際の経路追跡の間のこの値の再計算をなくす。しかしながら、リアルタイム制御の状況では、計画と呼吸や体の動きを含むライブ環境との間の差を埋め合わせるために弧がわずかに変化できるなら、スレッドの「オンザフライ」再計算が望ましいことがありうる。

【0081】

C. 4 基準／コスト

カテーテルの例については、最も簡単な経路が望まれる。カテーテルはしばしば柔軟だが曲がっているので、カテーテルは血管の壁面の内側に留まって壁面に圧力を加える。目的は壁面に沿った圧力を最小化することである。これは、ピーク圧力を検査するとともに最も応力のない形を通過のために使うことによって操縦の困難を最小化することにより、破裂の危険を最小化するためである。カテーテル先端についての曲率の最小限の逸脱が最適化基準となる。ただし、カットオフ最大値も課される。これを達成するため、先端が進む距離は、「通常の」応力がかかっていないカテーテル形状からの逸脱によって重みをかけられる。重みは、先端における応力に比例することができ、あるいは指数関数であることもできる。たとえば、重みは図12に示されるようなものでありうる。グラフ化の簡単のため、二つの重み付けられた弧しか示さない。一つは重み1の28mm半径の近傍者および重み7の14mm半径。

【0082】

C. 5 原子的なアクション／近傍／後継者

カテーテルの先端は二つの制御機能しかない。回転されることができ、押し込まれたり出されたりできる。カテーテルの末端を定義する弧は、気管支鏡と同じ型の回転半径によって近似でき、図13の同じコードがスレッドを生成するために使える。ただし、重みは先のセクションで述べたメトリックに従って重みが調節される。気管支鏡の例の場合と同様、各「スレッド」について近傍が計算される。カテーテルが進むにつれて、のちのカテーテル本体が先端によって設定された経路をたどる。カテーテルの基本機能を記述する名目近傍についてのデータ点および値の例は、付録Bで与えられる。この名目近傍は、各近傍者について、デフォルト（すなわち、アルファ、シータおよびファイの(0,0,0)配向）からのX,YおよびZにおける相対位置を同定する。名目近傍は一度、スタートアップ時に計算されるものとする。この近傍についてのデータの例が図13にグラフ化されている。

【0083】

ここで図13を参照すると、近傍の一部が図示されており、弧1310および1320について近傍者の集合が示されている。これらの例示的な弧は、それぞれ半径14mmおよび28mmについてのものである。スレッドの概念は、訪問可能な点の優先を表す。弧は、指定された回転半径をもつ円を描く約90度掃引である。90度が要求される最大である。したがって、近傍者の数は半径の大きさに関係している。すなわち、より大きな半径は、完全な90度の弧をカバーするために、より多くの近傍者を必要とするのである。

【0084】

次いでこの弧の組は、均一に離間してXのまわりに任意の度数、回転させられる。気管支鏡の場合と同様、スレッド番号は特定の回転半径および現在の配向に対するXのまわりの回転を含意する。図14は、14mmおよび28mmの半径をもつ弧スレッドを有する完成された名目近傍を示している。

【0085】

代替的に、任意の形のスレッドのそれぞれを生成するためにより洗練されたモデルが作成されることができる。明らかに、スレッドの数は、任意に大きな数、生成できる。3D領域のより大きな体積をカバーするために、近傍は多くの可能な半径を含む。この近傍は、スレッド／光ファイバー・ランプにおけるスレッド群と似た図5の類似の形によって示されるように、3Dで計算されることになる。よって、体積中のあらゆる状態が埋められるべきである。複雑なメトリックの例は、管の中心からの逸脱の割合によってコストをさらに増すものでありうる。

【0086】

C. 6 制約／禁止領域／障害物

10

このシステムへの入力、CTなどからのセグメント化された3D画像を含む。これは、組織の自由空間領域（すなわち、動きが許可される領域）および不正領域を定義する。自由空間のノードは「コスト付け未」に設定できる。これは、自由に更新されることを意味する。不正領域は「無限大」という特殊な（高い）値に設定される。これは、その経路が通ってはならないという指示でもある。

【0087】

C. 7 「ゴール」／「スタート」

「スタート」および「ゴール」の概念が使用できるいくつかの方法がある。現実には、経路の計算は、いずれの方向にスタートして行なってもよく、任意の方向コストを適正に計算するよう注意を払って行なうことができる。たとえば、一方通行の通りを逆方向に運

20

【0088】

「ゴール」は、血管形成またはRFアブレーションの目標とされる3D位置でありうる。この「ゴール」はその探索のための「シード」ノードとして使われる。カテーテルの先端まで給送された器具から生検が得られるべき場合などでは、接近の配向は医師によって提案されてもよい。この場合、「スタート」ノードは絶対必須ではない。

【0089】

「スタート」ノードが「シード」ノードであってもよい。「シード」ノードはしばしば、心臓応用のための大腿動脈の概略中心に位置される。この場合、「ゴール」ノードは絶対必須ではない。

30

【0090】

C. 8 一連のイベント／最適経路

カテーテルについても、コアのコスト波伝搬の点で、気管支鏡についてと同じプロセスがたどられる。上記のB. 8の議論を参照。

【0091】

C. 9 変形

制御または感知誤差のいずれかがありそうな場合、近傍を、理論的に可能なよりも狭く定義することが好ましい。たとえば、回転半径は可能な最小値よりも大きくされる。これは、手順の間のわずかな過剰修正による予期しない制御または感知誤差を埋め合わせしう

40

【0092】

C. 10 経路追跡

図7のステップ713での探索完了後、いくつかのプロセスが生起できる。

【0093】

「スタート」および「ゴール」が同定される場合、経路はレンダリングまたは実施されることができる。それは、セットポイント（setpoint）を器具に送り、進み距離およびカテーテルのアルファ（ α ）回転を与えることによる。これは、スレッド番号から知られる角である。あるいはまた、要求される角は、現在の位置および配向と目標の位置および配向との間の最適弧を計算することによって決定できる。好ましい実施形態では、シミュレーションのために、設定が迅速に計算されるよう、スレッド番号（図7のステップ790

50

からのような) または曲率および角度が保存される。

【0094】

「スタート」ノードが「シード」ノードであった場合、「ゴール」ノードは、3空間内で到達可能な諸状態を示すことによって医師により「拾われ」てもよい。その際、医師は、ステントのために提案される狭窄血管の位置のような目標位置を拾う。あるいはまた、コンピュータ援用検出システムが疑われる病変をハイライトすることができ、医師がこのサブセットの点のうちからより簡単に拾うことができる。

【0095】

「ゴール」ノードが「シード」ノードであった場合、カテーテルはリアルタイムで追跡されることがある。カテーテルの先端のx、y、z位置が、配位空間内での対応する位置を見出すのに使われることができる。カテーテルの先端の位置に基づいて、先端の角度が適正な角度に調節されることができる。

【0096】

カテーテルは角度アルファ (α) という一つのコントロールに加えて患者内に進んでいく能力をもつ。進みは、手で実行されるか、あるいは機械で実行されることができる。経路は「スタート」から「ゴール」までたどられ、配位空間から順に各「セットポイント」を読み出す。セットポイントは、現在の位置および配向、次のセットポイントに到達するための進みの量およびスレッド番号を与えるものである。スレッド番号は、次のセットポイントに到達するためにカテーテルがもつべき姿勢を与える。図14の例では、次の動作に対応する16のスレッドがある。

【0097】

【表2】

スレッド番号	アルファの変化(度)
1410または1411	0
1420または1421	+45
1430または1431	+90
1440または1441	+135
1450または1451	+または-180
1460または1461	-135
1470または1471	-90
1480または1481	-45

〈ベベルのある針の制御 (N) 〉

図15に示すもののようなベベルのある針は、曲がった経路を打つことが知られている(たとえば、Robert J. Webster III, Noah J. Cowan, Gregory S. Chirikjian, and Allison M. Okamura, “Nonholonomic Modeling of Needle Steering”, International Symposium of Experimental Robotics, Singapore, June, 2004 およびRobert J. Webster III, Jasenka Memisevic, and Allison M. Okamura, “Design Considerations for Robotic Needle Steering”, IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, April 2005を参照)

臨床的な目的は、そのような針を障害物および敏感な領域をよけて操縦するよう使うことである。従来技術の方法では、ベベルのある針についての計画は2次元に制限され、針は単一の平面内に留まるために0度または180度回転することが要求される。本発明のシステム、装置および方法は、6次元の配位空間を必要とすることなく、配向を含めて3次元での計画立案を可能にする。ある好ましい実施形態では、本発明は、ベベルのある針を体内に挿入することによってできる曲率を表す単一の弧近傍をもって使われる。好ましいはいる方向とともに目標が選択される。計画立案器(planner)は次いで本発明を使って、はいる領域から目標(「ゴール」)までの最適経路を生成する。探索を駆動し、短縮するためにヒューリスティックが使われない場合、表面から到達可能ないくつかの等価な「最適」経路があることがある。これは、他の装置およびアシスタントといった外的な障害物が

与えられたもとで外科医に手順の際に「スタート」ノードを選ぶ柔軟性を与えるので、貴重である。種々の組織との針の相互作用は、種々の型の曲がり、さらには（たとえば骨からの）偏移さえもを引き起こすことができる。本発明におけるように組織の型を先験的に検出できてはじめて、結果として得られる曲がり計画立案されることができる。

【0098】

術前計画立案

介入ガイダンス (interventional guidance) はしばしば、破局的な誤りのリスクを最小化しつつ最小のダメージを生成する最良のアクセスを決定するために、CTまたはMRI画像による事前計画立案を要求する。事前計画立案は、医師が、可能性のある問題についてリハーサルをし、そうした問題を回避するための器具を組み込むことを可能にする。提案される器具は、血管壁への応力のような不相応なコストなしでは「ゴール」位置に到達できないことがありうる。この場合、本発明を使うことで、利用可能なさまざまな器具のそれぞれについてのコストを提供し、所与の「スタート」および「ゴール」について最低コストをもつ器具を同定することができる。これは、本発明を使って、所与の体の中での各器具の使用をシミュレートすることにあたる。

10

【0099】

手術トレーニング

本システムは、制御のための指令を含め最良経路を提案するので、手術を練習するためのフィードバックとして使われることもできる。ある好ましい実施形態では、これは器具の先端におけるありそうな画像をレンダリングすることによって達成される。画像はスコープまたはカテーテルに対する直交画像であってもよいし、あるいはスコープまたはカテーテルを囲む画像であってもよい。

20

【0100】

手術制御

器具のための制御コマンドは、現在の配位状態に従って、器具を進め、スコープについてはスコープの角度設定ダイヤルを回す医師および自動化システムに向けられることができる。

【0101】

動物検査

動物実験におけるように迅速かつ反復可能な制御が望まれる場合、この応用のために小さなスコープが使用され、制御されうる。

30

【0102】

DNAベースの情報

特定の腫瘍またはその他の病変を標本採取するための最良のアプローチを決定するためにDNA情報を使うことができる。これは、望ましい目標選択、はいる角度またはコスト重み付けがDNA指標に基づいて適応されうるよう、組み込まれうる。たとえば、DNAにより脈管構造を介した癌の転移のより高い可能性が示されるいくつかの病変については、血管はより高い重みを有することができる。結果として得られる生検または摘出経路は、病変の支持 (supporting) 脈管構造を切断する経路を最小化することになる。

40

【0103】

装置およびシステム

ここで図16を参照すると、方向付け可能な (directable) 先端1605をもつ器具1604をガイドするシステムが示されている。システム1600は、図17に示される、最適経路決定のための装置1700を含む。装置1700は、所与の姿勢のあらゆる到達可能な近傍者を生成する近傍生成モジュール730と、前記所与の姿勢から各近傍者への遷移のコストを計算する遷移コスト $t(n)$ 計算モジュール1603と、ゴールから前記所与の姿勢までコスト波を伝搬させるコスト波伝搬モジュール770と、最低コスト近傍者を選択する経路決定モジュール700とを含む。最適経路1606は、コスト（またはコスト決定因として作用する他の何らかの目的関数）の最小化に基づいて決定され、デジタル・データ処理ユニット1601によってメモリ1608内に保存され、デジタル・データ

50

処理ユニット1601によって介入者(interventionalist)1602または器具コントローラ・システム1607のいずれかに利用可能にされる。最適経路および中間的な候補姿勢はメモリ1608内に保存され、ある好ましい実施形態では、経路決定の間のいかなる所与の時点においても最小コストの候補がヒープの一番上にくるよう、候補姿勢をコストによって順序付けるために、ヒープが使われる。デジタル・データ処理ユニット1601は装置1700のさまざまなモジュールを最適経路の決定において指揮し、中間的および最終的な経路をメモリおよびヒープ1608に保存するとともに、以前にメモリ1608中に保存された決定された最適経路を、指示されるのに応じて、コントローラ・システム1607および介入者ワークステーション1602に提供する。

【0104】

10

本発明の好ましい実施形態が図示され、説明されてきたが、当業者は、ここに記載されるシステム、装置および方法が例示的であり、本発明の真の範囲から外れることなく、さまざまな変更および修正がなされてもよく、その要素について等価物が代替されてもよいことを理解するであろう。さらに、本発明の教示を、その中心的な範囲から外れることなくカテーテルおよびスコープ経路計画立案に適応させるよう多くの修正がなしうる。したがって、本発明は、本発明を実施するために考えられている最良の形態として開示される特定の実施形態に限定されず、本発明は付属の請求項の範囲にはいるあらゆる実施形態を含むことが意図されている。

【0105】

付録A

20

【表 3】

まっすぐなスレッド

アルファ=0度
増分0.050(2.865度)の名目弧

注:シータおよびファイはラジアン(度)で示す

s	x	y	シータ	ファイ	コスト
0.0	1.0	0.0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	1.0
0.0	2.0	0.0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	2.0
0.0	3.0	0.0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	3.0
0.0	4.0	0.0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	4.0
0.0	5.0	0.0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	5.0
0.0	6.0	0.0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	6.0
0.0	7.0	0.0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	7.0
0.0	8.0	0.0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	8.0
0.0	9.0	0.0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	9.0
0.0	10.0	0.0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	10.0
0.0	11.0	0.0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	11.0
0.0	12.0	0.0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	12.0
0.0	13.0	0.0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	13.0
0.0	14.0	0.0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	14.0
0.0	15.0	0.0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	15.0
0.0	16.0	0.0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	16.0
0.0	17.0	0.0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	17.0
0.0	18.0	0.0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	18.0
0.0	19.0	0.0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	19.0
0.0	20.0	0.0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	20.0
0.0	21.0	0.0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	21.0
0.0	22.0	0.0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	22.0
0.0	23.0	0.0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	23.0
0.0	24.0	0.0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	24.0
0.0	25.0	0.0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	25.0
0.0	26.0	0.0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	26.0
0.0	27.0	0.0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	27.0
0.0	28.0	0.0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	28.0
0.0	29.0	0.0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	29.0
0.0	30.0	0.0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	30.0
0.0	31.0	0.0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	31.0
0.0	32.0	0.0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	32.0
0.0	33.0	0.0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	33.0
0.0	34.0	0.0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	34.0
0.0	35.0	0.0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	35.0
0.0	36.0	0.0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	36.0
0.0	37.0	0.0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	37.0
0.0	38.0	0.0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	38.0
0.0	39.0	0.0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	39.0
0.0	40.0	0.0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	40.0

10

20

30

40

【0 1 0 6】

【表 4】

このスレッドのアルファ回転=0.0(0.0)

注:シータおよびファイはラジアン(度)で示す

s	x	y	シータ	ファイ	コスト
0.0	1.0	0.0	0.0 (0.0)	0.1 (2.9)	1.0
0.0	2.0	0.1	0.0 (0.0)	0.1 (5.7)	2.0
0.0	3.0	0.2	0.0 (0.0)	0.2 (8.6)	3.0
0.0	4.0	0.4	0.0 (0.0)	0.2 (11.5)	4.0
0.0	4.9	0.6	0.0 (0.0)	0.3 (14.3)	5.0
0.0	5.9	0.9	0.0 (0.0)	0.3 (17.2)	6.0
0.0	6.9	1.2	0.0 (0.0)	0.3 (20.1)	7.0
0.0	7.8	1.6	0.0 (0.0)	0.4 (22.9)	8.0
0.0	8.7	2.0	0.0 (0.0)	0.4 (25.8)	9.0
0.0	9.6	2.4	0.0 (0.0)	0.5 (28.6)	10.0
0.0	10.5	2.9	0.0 (0.0)	0.6 (31.5)	11.0
0.0	11.3	3.5	0.0 (0.0)	0.6 (34.4)	12.0
0.0	12.1	4.1	0.0 (0.0)	0.6 (37.2)	13.0
0.0	12.9	4.7	0.0 (0.0)	0.7 (40.1)	14.0
0.0	13.6	5.4	0.0 (0.0)	0.8 (43.0)	15.0
0.0	14.3	6.1	0.0 (0.0)	0.8 (45.8)	16.0
0.0	15.0	6.8	0.0 (0.0)	0.9 (48.7)	17.0
0.0	15.7	7.6	0.0 (0.0)	0.9 (51.6)	18.0
0.0	16.3	8.4	0.0 (0.0)	0.9 (54.4)	19.0
0.0	16.8	9.2	0.0 (0.0)	1.0 (57.3)	20.0
0.0	17.3	10.0	0.0 (0.0)	1.0 (60.2)	21.0
0.0	17.8	10.9	0.0 (0.0)	1.1 (63.0)	22.0
0.0	18.3	11.8	0.0 (0.0)	1.1 (65.9)	23.0
0.0	18.6	12.8	0.0 (0.0)	1.2 (68.8)	24.0
0.0	19.0	13.7	0.0 (0.0)	1.3 (71.6)	25.0
0.0	19.3	14.7	0.0 (0.0)	1.3 (74.5)	26.0
0.0	19.5	15.6	0.0 (0.0)	1.4 (77.3)	27.0
0.0	19.7	16.6	0.0 (0.0)	1.4 (80.2)	28.0
0.0	19.9	17.6	0.0 (0.0)	1.5 (83.1)	29.0
0.0	19.9	18.6	0.0 (0.0)	1.5 (85.9)	30.0
0.0	20.0	19.6	0.0 (0.0)	1.5 (88.8)	31.0

10

20

30

【 0 1 0 7 】

【表 5】

このスレッドのアルファ回転=0.8(45.0)

注:シータおよびファイはラジアン(度)で示す

s	x	y	シータ	ファイ	コスト
0.0	1.0	0.0	0.0 (2.0)	0.0(2.0)	1.0
0.1	2.0	0.1	0.1 (4.1)	0.1(4.1)	2.0
0.2	3.0	0.2	0.1 (6.1)	0.1(6.1)	3.0
0.3	4.0	0.3	0.1 (8.1)	0.1(8.1)	4.0
0.4	4.9	0.4	0.2 (10.1)	0.2(10.1)	5.0
0.6	5.9	0.6	0.2 (12.2)	0.2(12.2)	6.0
0.9	6.9	0.9	0.2 (14.2)	0.2(14.2)	7.0
1.1	7.8	1.1	0.3 (16.2)	0.3(16.2)	8.0
1.4	8.7	1.4	0.3 (18.2)	0.3(18.2)	9.0
1.7	9.6	1.7	0.4 (20.3)	0.4(20.3)	10.0
2.1	10.5	2.1	0.4 (22.3)	0.4(22.3)	11.0
2.5	11.3	2.5	0.4 (24.3)	0.4(24.3)	12.0
2.9	12.1	2.9	0.5 (26.3)	0.5(26.3)	13.0
3.3	12.9	3.3	0.5 (28.4)	0.5(28.4)	14.0
3.8	13.6	3.8	0.5 (30.4)	0.5(30.4)	15.0
4.3	14.3	4.3	0.6 (32.4)	0.6(32.4)	16.0
4.8	15.0	4.8	0.6 (34.4)	0.6(34.4)	17.0
5.4	15.7	5.4	0.6 (36.5)	0.6(36.5)	18.0
5.9	16.3	5.9	0.7 (38.5)	0.7(38.5)	19.0
6.5	16.8	6.5	0.7 (40.5)	0.7(40.5)	20.0
7.1	17.3	7.1	0.7 (42.5)	0.7(42.5)	21.0
7.7	17.8	7.7	0.8 (44.6)	0.8(44.6)	22.0
8.4	18.3	8.4	0.8 (46.6)	0.8(46.6)	23.0
9.0	18.6	9.0	0.8 (48.6)	0.8(48.6)	24.0
9.7	19.0	9.7	0.9 (50.6)	0.9(50.6)	25.0
10.4	19.3	10.4	0.9 (52.7)	0.9(52.7)	26.0
11.0	19.5	11.0	1.0 (54.7)	1.0(54.7)	27.0
11.7	19.7	11.7	1.0 (56.7)	1.0(56.7)	28.0
12.4	19.9	12.4	1.0 (58.7)	1.0(58.7)	29.0
13.1	19.9	13.1	1.1 (60.8)	1.1(60.8)	30.0
13.8	20.0	13.8	1.1 (62.8)	1.1(62.8)	31.0

【 0 1 0 8】

10

20

30

【表 6】

このスレッドのアルファ回転=1.6(90.0)

注:シータおよびファイはラジアン(度)で示す

s	x	y	シータ	ファイ	コスト
0.0	1.0	-0.0	0.1 (2.9)	-0.0(-0.0)	1.0
0.1	2.0	-0.0	0.1 (5.7)	-0.0(-0.0)	2.0
0.2	3.0	-0.0	0.2 (8.6)	-0.0(-0.0)	3.0
0.4	4.0	-0.0	0.2 (11.5)	-0.0(-0.0)	4.0
0.6	4.9	-0.0	0.3 (14.3)	-0.0(-0.0)	5.0
0.9	5.9	-0.0	0.3 (17.2)	-0.0(-0.0)	6.0
1.2	6.9	-0.0	0.3 (20.1)	-0.0(-0.0)	7.0
1.6	7.8	-0.0	0.4 (22.9)	-0.0(-0.0)	8.0
2.0	8.7	-0.0	0.4 (25.8)	-0.0(-0.0)	9.0
2.4	9.6	-0.0	0.5 (28.6)	-0.0(-0.0)	10.0
2.9	10.5	-0.0	0.6 (31.5)	-0.0(-0.0)	11.0
3.5	11.3	-0.0	0.6 (34.4)	-0.0(-0.0)	12.0
4.1	12.1	-0.0	0.6 (37.2)	-0.0(-0.0)	13.0
4.7	12.9	-0.0	0.7 (40.1)	-0.0(-0.0)	14.0
5.4	13.6	-0.0	0.8 (43.0)	-0.0(-0.0)	15.0
6.1	14.3	-0.0	0.8 (45.8)	-0.0(-0.0)	16.0
6.8	15.0	-0.0	0.9 (48.7)	-0.0(-0.0)	17.0
7.6	15.7	-0.0	0.9 (51.6)	-0.0(-0.0)	18.0
8.4	16.3	-0.0	0.9 (54.4)	-0.0(-0.0)	19.0
9.2	16.8	-0.0	1.0 (57.3)	-0.0(-0.0)	20.0
10.0	17.3	-0.0	1.0 (60.2)	-0.0(-0.0)	21.0
10.9	17.8	-0.0	1.1 (63.0)	-0.0(-0.0)	22.0
11.8	18.3	-0.0	1.1 (65.9)	-0.0(-0.0)	23.0
12.8	18.6	-0.0	1.2 (68.8)	-0.0(-0.0)	24.0
13.7	19.0	-0.0	1.3 (71.6)	-0.0(-0.0)	25.0
14.7	19.3	-0.0	1.3 (74.5)	-0.0(-0.0)	26.0
15.6	19.5	-0.0	1.4 (77.3)	-0.0(-0.0)	27.0
16.6	19.7	-0.0	1.4 (80.2)	-0.0(-0.0)	28.0
17.6	19.9	-0.0	1.5 (83.1)	-0.0(-0.0)	29.0
18.6	19.9	-0.0	1.5 (85.9)	-0.0(-0.0)	30.0
19.6	20.0	-0.0	1.5 (88.8)	-0.0(-0.0)	31.0

10

20

30

【0 1 0 9】

【表 7】

このスレッドのアルファ回転=2.4(135.0)

注: シータおよびファイはラジアン(度)で示す

s	x	y	シータ	ファイ	コスト
0.0	1.0	-0.0	0.0 (2.0)	-0.0 (-2.0)	1.0
0.1	2.0	-0.1	0.1 (4.1)	-0.1 (-4.1)	2.0
0.2	3.0	-0.2	0.1 (6.1)	-0.1 (-6.1)	3.0
0.3	4.0	-0.3	0.1 (8.1)	-0.1 (-8.1)	4.0
0.4	4.9	-0.4	0.2 (10.1)	-0.2 (-10.1)	5.0
0.6	5.9	-0.6	0.2 (12.2)	-0.2 (-12.2)	6.0
0.9	6.9	-0.9	0.2 (14.2)	-0.2 (-14.2)	7.0
1.1	7.8	-1.1	0.3 (16.2)	-0.3 (-16.2)	8.0
1.4	8.7	-1.4	0.3 (18.2)	-0.3 (-18.2)	9.0
1.7	9.6	-1.7	0.4 (20.3)	-0.4 (-20.3)	10.0
2.1	10.5	-2.1	0.4 (22.3)	-0.4 (-22.3)	11.0
2.5	11.3	-2.5	0.4 (24.3)	-0.4 (-24.3)	12.0
2.9	12.1	-2.9	0.5 (26.3)	-0.5 (-26.3)	13.0
3.3	12.9	-3.3	0.5 (28.4)	-0.5 (-28.4)	14.0
3.8	13.6	-3.8	0.5 (30.4)	-0.5 (-30.4)	15.0
4.3	14.3	-4.3	0.6 (32.4)	-0.6 (-32.4)	16.0
4.8	15.0	-4.8	0.6 (34.4)	-0.6 (-34.4)	17.0
5.4	15.7	-5.4	0.6 (36.5)	-0.6 (-36.5)	18.0
5.9	16.3	-5.9	0.7 (38.5)	-0.7 (-38.5)	19.0
6.5	16.8	-6.5	0.7 (40.5)	-0.7 (-40.5)	20.0
7.1	17.3	-7.1	0.7 (42.5)	-0.7 (-42.5)	21.0
7.7	17.8	-7.7	0.8 (44.6)	-0.8 (-44.6)	22.0
8.4	18.3	-8.4	0.8 (46.6)	-0.8 (-46.6)	23.0
9.0	18.6	-9.0	0.8 (48.6)	-0.8 (-48.6)	24.0
9.7	19.0	-9.7	0.9 (50.6)	-0.9 (-50.6)	25.0
10.4	19.3	-10.4	0.9 (52.7)	-0.9 (-52.7)	26.0
11.0	19.5	-11.0	1.0 (54.7)	-1.0 (-54.7)	27.0
11.7	19.7	-11.7	1.0 (56.7)	-1.0 (-56.7)	28.0
12.4	19.9	-12.4	1.0 (58.7)	-1.0 (-58.7)	29.0
13.1	19.9	-13.1	1.1 (60.8)	-1.1 (-60.8)	30.0
13.8	20.0	-13.8	1.1 (62.8)	-1.1 (-62.8)	31.0

10

20

30

【0 1 1 0】

【表 8】

このスレッドのアルファ回転=3.1(180.0)

注:シータおよびファイはラジアン(度)で示す

s	x	y	シータ	ファイ	コスト
-0.0	1.0	- 0.0	-0.0 (-0.0)	-0.1 (- 2.9)	1.0
-0.0	2.0	- 0.1	-0.0 (-0.0)	-0.1 (- 5.7)	2.0
-0.0	3.0	- 0.2	-0.0 (-0.0)	-0.2 (- 8.6)	3.0
-0.0	4.0	- 0.4	-0.0 (-0.0)	-0.2 (-11.5)	4.0
-0.0	4.9	- 0.6	-0.0 (-0.0)	-0.3 (-14.3)	5.0
-0.0	5.9	- 0.9	-0.0 (-0.0)	-0.3 (-17.2)	6.0
-0.0	6.9	- 1.2	-0.0 (-0.0)	-0.3 (-20.1)	7.0
-0.0	7.8	- 1.6	-0.0 (-0.0)	-0.4 (-22.9)	8.0
-0.0	8.7	- 2.0	-0.0 (-0.0)	-0.4 (-25.8)	9.0
-0.0	9.6	- 2.4	-0.0 (-0.0)	-0.5 (-28.6)	10.0
-0.0	10.5	- 2.9	-0.0 (-0.0)	-0.6 (-31.5)	11.0
-0.0	11.3	- 3.5	-0.0 (-0.0)	-0.6 (-34.4)	12.0
-0.0	12.1	- 4.1	-0.0 (-0.0)	-0.6 (-37.2)	13.0
-0.0	12.9	- 4.7	-0.0 (-0.0)	-0.7 (-40.1)	14.0
-0.0	13.6	- 5.4	-0.0 (-0.0)	-0.8 (-43.0)	15.0
-0.0	14.3	- 6.1	-0.0 (-0.0)	-0.8 (-45.8)	16.0
-0.0	15.0	- 6.8	-0.0 (-0.0)	-0.9 (-48.7)	17.0
-0.0	15.7	- 7.6	-0.0 (-0.0)	-0.9 (-51.6)	18.0
-0.0	16.3	- 8.4	-0.0 (-0.0)	-0.9 (-54.4)	19.0
-0.0	16.8	- 9.2	-0.0 (-0.0)	-1.0 (-57.3)	20.0
-0.0	17.3	-10.0	-0.0 (-0.0)	-1.0 (-60.2)	21.0
-0.0	17.8	-10.9	-0.0 (-0.0)	-1.1 (-63.0)	22.0
-0.0	18.3	-11.8	-0.0 (-0.0)	-1.1 (-65.9)	23.0
-0.0	18.6	-12.8	-0.0 (-0.0)	-1.2 (-68.8)	24.0
-0.0	19.0	-13.7	-0.0 (-0.0)	-1.3 (-71.6)	25.0
-0.0	19.3	-14.7	-0.0 (-0.0)	-1.3 (-74.5)	26.0
-0.0	19.5	-15.6	-0.0 (-0.0)	-1.4 (-77.3)	27.0
-0.0	19.7	-16.6	-0.0 (-0.0)	-1.4 (-80.2)	28.0
-0.0	19.9	-17.6	-0.0 (-0.0)	-1.5 (-83.1)	29.0
-0.0	19.9	-18.6	-0.0 (-0.0)	-1.5 (-85.9)	30.0
-0.0	20.0	-19.6	-0.0 (-0.0)	-1.5 (-88.8)	31.0

10

20

30

【 0 1 1 1 】

【表 9】

このスレッドのアルファ回転=3.9(225.0)
 注:シータおよびファイはラジアン(度)で示す

s	x	y	シータ	ファイ	コスト
-0.0	1.0	- 0.0	-0.0 (- 2.0)	-0.0(- 2.0)	1.0
-0.1	2.0	- 0.1	-0.1 (- 4.1)	-0.1(- 4.1)	2.0
-0.2	3.0	- 0.2	-0.1 (- 6.1)	-0.1(- 6.1)	3.0
-0.3	4.0	- 0.3	-0.1 (- 8.1)	-0.1(- 8.1)	4.0
-0.4	4.9	- 0.4	-0.2 (-10.1)	-0.2(-10.1)	5.0
-0.6	5.9	- 0.6	-0.2 (-12.2)	-0.2(-12.2)	6.0
-0.9	6.9	- 0.9	-0.2 (-14.2)	-0.2(-14.2)	7.0
-1.1	7.8	- 1.1	-0.3 (-16.2)	-0.3(-16.2)	8.0
-1.4	8.7	- 1.4	-0.3 (-18.2)	-0.3(-18.2)	9.0
-1.7	9.6	- 1.7	-0.4 (-20.3)	-0.4(-20.3)	10.0
-2.1	10.5	- 2.1	-0.4 (-22.3)	-0.4(-22.3)	11.0
-2.5	11.3	- 2.5	-0.4 (-24.3)	-0.4(-24.3)	12.0
-2.9	12.1	- 2.9	-0.5 (-26.3)	-0.5(-26.3)	13.0
-3.3	12.9	- 3.3	-0.5 (-28.4)	-0.5(-28.4)	14.0
-3.8	13.6	- 3.8	-0.5 (-30.4)	-0.5(-30.4)	15.0
-4.3	14.3	- 4.3	-0.6 (-32.4)	-0.6(-32.4)	16.0
-4.8	15.0	- 4.8	-0.6 (-34.4)	-0.6(-34.4)	17.0
-5.4	15.7	- 5.4	-0.6 (-36.5)	-0.6(-36.5)	18.0
-5.9	16.3	- 5.9	-0.7 (-38.5)	-0.7(-38.5)	19.0
-6.5	16.8	- 6.5	-0.7 (-40.5)	-0.7(-40.5)	20.0
-7.1	17.3	- 7.1	-0.7 (-42.5)	-0.7(-42.5)	21.0
-7.7	17.8	- 7.7	-0.8 (-44.6)	-0.8(-44.6)	22.0
-8.4	18.3	- 8.4	-0.8 (-46.6)	-0.8(-46.6)	23.0
-9.0	18.6	- 9.0	-0.8 (-48.6)	-0.8(-48.6)	24.0
-9.7	19.0	- 9.7	-0.9 (-50.6)	-0.9(-50.6)	25.0
-10.4	19.3	-10.4	-0.9 (-52.7)	-0.9(-52.7)	26.0
-11.0	19.5	-11.0	-1.0 (-54.7)	-1.0(-54.7)	27.0
-11.7	19.7	-11.7	-1.0 (-56.7)	-1.0(-56.7)	28.0
-12.4	19.9	-12.4	-1.0 (-58.7)	-1.0(-58.7)	29.0
-13.1	19.9	-13.1	-1.1 (-60.8)	-1.1(-60.8)	30.0
-13.8	20.0	-13.8	-1.1 (-62.8)	-1.1(-62.8)	31.0

10

20

30

【 0 1 1 2 】

【表 1 0】

このスレッドのアルファ回転=4.7(270.0)
 注:シータおよびファイはラジアン(度)で示す

s	x	y	シータ	ファイ	コスト
-0.0	1.0	0.0	-0.1 (- 2.9)	0.0(0.0)	1.0
-0.1	2.0	0.0	-0.1 (- 5.7)	0.0(0.0)	2.0
-0.2	3.0	0.0	-0.2 (- 8.6)	0.0(0.0)	3.0
-0.4	4.0	0.0	-0.2 (-11.5)	0.0(0.0)	4.0
-0.6	4.9	0.0	-0.3 (-14.3)	0.0(0.0)	5.0
-0.9	5.9	0.0	-0.3 (-17.2)	0.0(0.0)	6.0
-1.2	6.9	0.0	-0.3 (-20.1)	0.0(0.0)	7.0
-1.6	7.8	0.0	-0.4 (-22.9)	0.0(0.0)	8.0
-2.0	8.7	0.0	-0.4 (-25.8)	0.0(0.0)	9.0
-2.4	9.6	0.0	-0.5 (-28.6)	0.0(0.0)	10.0
-2.9	10.5	0.0	-0.6 (-31.5)	0.0(0.0)	11.0
-3.5	11.3	0.0	-0.6 (-34.4)	0.0(0.0)	12.0
-4.1	12.1	0.0	-0.6 (-37.2)	0.0(0.0)	13.0
-4.7	12.9	0.0	-0.7 (-40.1)	0.0(0.0)	14.0
-5.4	13.6	0.0	-0.8 (-43.0)	0.0(0.0)	15.0
-6.1	14.3	0.0	-0.8 (-45.8)	0.0(0.0)	16.0
-6.8	15.0	0.0	-0.9 (-48.7)	0.0(0.0)	17.0
-7.6	15.7	0.0	-0.9 (-51.6)	0.0(0.0)	18.0
-8.4	16.3	0.0	-0.9 (-54.4)	0.0(0.0)	19.0
-9.2	16.8	0.0	-1.0 (-57.3)	0.0(0.0)	20.0
-10.0	17.3	0.0	-1.0 (-60.2)	0.0(0.0)	21.0
-10.9	17.8	0.0	-1.1 (-63.0)	0.0(0.0)	22.0
-11.8	18.3	0.0	-1.1 (-65.9)	0.0(0.0)	23.0
-12.8	18.6	0.0	-1.2 (-68.8)	0.0(0.0)	24.0
-13.7	19.0	0.0	-1.3 (-71.6)	0.0(0.0)	25.0
-14.7	19.3	0.0	-1.3 (-74.5)	0.0(0.0)	26.0
-15.6	19.5	0.0	-1.4 (-77.3)	0.0(0.0)	27.0
-16.6	19.7	0.0	-1.4 (-80.2)	0.0(0.0)	28.0
-17.6	19.9	0.0	-1.5 (-83.1)	0.0(0.0)	29.0
-18.6	19.9	0.0	-1.5 (-85.9)	0.0(0.0)	30.0
-19.6	20.0	0.0	-1.5 (-88.8)	0.0(0.0)	31.0

10

20

30

【 0 1 1 3】

【表 1 1】

このスレッドのアルファ回転=5.5(315.0)

注: シータおよびファイはラジアン(度)で示す

s	x	y	シータ	ファイ	コスト
- 0.0	1.0	0.0	-0.0 (- 2.0)	0.0(2.0)	1.0
- 0.1	2.0	0.1	-0.1 (- 4.1)	0.1(4.1)	2.0
- 0.2	3.0	0.2	-0.1 (- 6.1)	0.1(6.1)	3.0
- 0.3	4.0	0.3	-0.1 (- 8.1)	0.1(8.1)	4.0
- 0.4	4.9	0.4	-0.2 (-10.1)	0.2(10.1)	5.0
- 0.6	5.9	0.6	-0.2 (-12.2)	0.2(12.2)	6.0
- 0.9	6.9	0.9	-0.2 (-14.2)	0.2(14.2)	7.0
- 1.1	7.8	1.1	-0.3 (-16.2)	0.3(16.2)	8.0
- 1.4	8.7	1.4	-0.3 (-18.2)	0.3(18.2)	9.0
- 1.7	9.6	1.7	-0.4 (-20.3)	0.4(20.3)	10.0
- 2.1	10.5	2.1	-0.4 (-22.3)	0.4(22.3)	11.0
- 2.5	11.3	2.5	-0.4 (-24.3)	0.4(24.3)	12.0
- 2.9	12.1	2.9	-0.5 (-26.3)	0.5(26.3)	13.0
- 3.3	12.9	3.3	-0.5 (-28.4)	0.5(28.4)	14.0
- 3.8	13.6	3.8	-0.5 (-30.4)	0.5(30.4)	15.0
- 4.3	14.3	4.3	-0.6 (-32.4)	0.6(32.4)	16.0
- 4.8	15.0	4.8	-0.6 (-34.4)	0.6(34.4)	17.0
- 5.4	15.7	5.4	-0.6 (-36.5)	0.6(36.5)	18.0
- 5.9	16.3	5.9	-0.7 (-38.5)	0.7(38.5)	19.0
- 6.5	16.8	6.5	-0.7 (-40.5)	0.7(40.5)	20.0
- 7.1	17.3	7.1	-0.7 (-42.5)	0.7(42.5)	21.0
- 7.7	17.8	7.7	-0.8 (-44.6)	0.8(44.6)	22.0
- 8.4	18.3	8.4	-0.8 (-46.6)	0.8(46.6)	23.0
- 9.0	18.6	9.0	-0.8 (-48.6)	0.8(48.6)	24.0
- 9.7	19.0	9.7	-0.9 (-50.6)	0.9(50.6)	25.0
-10.4	19.3	10.4	-0.9 (-52.7)	0.9(52.7)	26.0
-11.0	19.5	11.0	-1.0 (-54.7)	1.0(54.7)	27.0
-11.7	19.7	11.7	-1.0 (-56.7)	1.0(56.7)	28.0
-12.4	19.9	12.4	-1.0 (-58.7)	1.0(58.7)	29.0
-13.1	19.9	13.1	-1.1 (-60.8)	1.1(60.8)	30.0
-13.8	20.0	13.8	-1.1 (-62.8)	1.1(62.8)	31.0

10

20

30

【0 1 1 4】

付録B

半径28mmの近傍の生成

【表 1 2】

このスレッドのアルファ回転=0.0(0.0)

注:シータおよびファイはラジアン(度)で示す

s	x	y	シータ	ファイ	コスト
0.0	1.0	0.0	0.0 (0.0)	0.0 (2.0)	1.0
0.0	2.0	0.1	0.0 (0.0)	0.1 (4.1)	2.0
0.0	3.0	0.2	0.0 (0.0)	0.1 (6.1)	3.0
0.0	4.0	0.3	0.0 (0.0)	0.1 (8.2)	4.0
0.0	5.0	0.4	0.0 (0.0)	0.2 (10.2)	5.0
0.0	6.0	0.6	0.0 (0.0)	0.2 (12.3)	6.0
0.0	6.9	0.9	0.0 (0.0)	0.3 (14.3)	7.0
0.0	7.9	1.1	0.0 (0.0)	0.3 (16.4)	8.0
0.0	8.8	1.4	0.0 (0.0)	0.3 (18.4)	9.0
0.0	9.8	1.8	0.0 (0.0)	0.4 (20.5)	10.0
0.0	10.7	2.1	0.0 (0.0)	0.4 (22.5)	11.0
0.0	11.6	2.5	0.0 (0.0)	0.4 (24.6)	12.0
0.0	12.5	3.0	0.0 (0.0)	0.5 (26.6)	13.0
0.0	13.4	3.4	0.0 (0.0)	0.5 (28.6)	14.0
0.0	14.3	3.9	0.0 (0.0)	0.5 (30.7)	15.0
0.0	15.1	4.4	0.0 (0.0)	0.6 (32.7)	16.0
0.0	16.0	5.0	0.0 (0.0)	0.6 (34.8)	17.0
0.0	16.8	5.6	0.0 (0.0)	0.6 (36.8)	18.0
0.0	17.6	6.2	0.0 (0.0)	0.7 (38.9)	19.0
0.0	18.3	6.8	0.0 (0.0)	0.7 (40.9)	20.0
0.0	19.1	7.5	0.0 (0.0)	0.8 (43.0)	21.0
0.0	19.8	8.2	0.0 (0.0)	0.8 (45.0)	22.0
0.0	20.5	8.9	0.0 (0.0)	0.8 (47.1)	23.0
0.0	21.2	9.7	0.0 (0.0)	0.9 (49.1)	24.0
0.0	21.8	10.4	0.0 (0.0)	0.9 (51.2)	25.0
0.0	22.4	11.2	0.0 (0.0)	0.9 (53.2)	26.0
0.0	23.0	12.0	0.0 (0.0)	1.0 (55.2)	27.0
0.0	23.6	12.9	0.0 (0.0)	1.0 (57.3)	28.0
0.0	24.1	13.7	0.0 (0.0)	1.0 (59.3)	29.0
0.0	24.6	14.6	0.0 (0.0)	1.1 (61.4)	30.0
0.0	25.0	15.5	0.0 (0.0)	1.1 (63.4)	31.0
0.0	25.5	16.4	0.0 (0.0)	1.1 (65.5)	32.0
0.0	25.9	17.3	0.0 (0.0)	1.2 (67.5)	33.0
0.0	26.2	18.2	0.0 (0.0)	1.2 (69.6)	34.0
0.0	26.6	19.2	0.0 (0.0)	1.3 (71.6)	35.0
0.0	26.9	20.1	0.0 (0.0)	1.3 (73.7)	36.0
0.0	27.1	21.1	0.0 (0.0)	1.3 (75.7)	37.0
0.0	27.4	22.1	0.0 (0.0)	1.4 (77.8)	38.0
0.0	27.6	23.0	0.0 (0.0)	1.4 (79.8)	39.0
0.0	27.7	24.0	0.0 (0.0)	1.4 (81.9)	40.0
0.0	27.8	25.0	0.0 (0.0)	1.5 (83.9)	41.0
0.0	27.9	26.0	0.0 (0.0)	1.5 (85.9)	42.0
0.0	28.0	27.0	0.0 (0.0)	1.5 (88.0)	43.0

10

20

30

【0 1 1 5】

【表 1 3】

このスレッドのアルファ回転=0.8(45.0)

注:シータおよびファイはラジアン(度)で示す

s	x	y	シータ	ファイ	コスト
0.0	1.0	0.0	0.0 (1.4)	0.0 (1.4)	1.0
0.1	2.0	0.1	0.1 (2.9)	0.1 (2.9)	2.0
0.1	3.0	0.1	0.1 (4.3)	0.1 (4.3)	3.0
0.2	4.0	0.2	0.1 (5.8)	0.1 (5.8)	4.0
0.3	5.0	0.3	0.1 (7.2)	0.1 (7.2)	5.0
0.5	6.0	0.5	0.2 (8.7)	0.2 (8.7)	6.0
0.6	6.9	0.6	0.2 (10.1)	0.2 (10.1)	7.0
0.8	7.9	0.8	0.2 (11.6)	0.2 (11.6)	8.0
1.0	8.8	1.0	0.2 (13.0)	0.2 (13.0)	9.0
1.2	9.8	1.2	0.3 (14.5)	0.3 (14.5)	10.0
1.5	10.7	1.5	0.3 (15.9)	0.3 (15.9)	11.0
1.8	11.6	1.8	0.3 (17.4)	0.3 (17.4)	12.0
2.1	12.5	2.1	0.3 (18.8)	0.3 (18.8)	13.0
2.4	13.4	2.4	0.4 (20.3)	0.4 (20.3)	14.0
2.8	14.3	2.8	0.4 (21.7)	0.4 (21.7)	15.0
3.1	15.1	3.1	0.4 (23.2)	0.4 (23.2)	16.0
3.5	16.0	3.5	0.4 (24.6)	0.4 (24.6)	17.0
4.0	16.8	4.0	0.5 (26.0)	0.5 (26.0)	18.0
4.4	17.6	4.4	0.5 (27.5)	0.5 (27.5)	19.0
4.8	18.3	4.8	0.5 (28.9)	0.5 (28.9)	20.0
5.3	19.1	5.3	0.5 (30.4)	0.5 (30.4)	21.0
5.8	19.8	5.8	0.6 (31.8)	0.6 (31.8)	22.0
6.3	20.5	6.3	0.6 (33.3)	0.6 (33.3)	23.0
6.8	21.2	6.8	0.6 (34.7)	0.6 (34.7)	24.0
7.4	21.8	7.4	0.6 (36.2)	0.6 (36.2)	25.0
7.9	22.4	7.9	0.7 (37.6)	0.7 (37.6)	26.0
8.5	23.0	8.5	0.7 (39.1)	0.7 (39.1)	27.0
9.1	23.6	9.1	0.7 (40.5)	0.7 (40.5)	28.0
9.7	24.1	9.7	0.7 (42.0)	0.7 (42.0)	29.0
10.3	24.6	10.3	0.8 (43.4)	0.8 (43.4)	30.0
10.9	25.0	10.9	0.8 (44.9)	0.8 (44.9)	31.0
11.6	25.5	11.6	0.8 (46.3)	0.8 (46.3)	32.0
12.2	25.9	12.2	0.8 (47.7)	0.8 (47.7)	33.0
12.9	26.2	12.9	0.9 (49.2)	0.9 (49.2)	34.0
13.6	26.6	13.6	0.9 (50.6)	0.9 (50.6)	35.0
14.2	26.9	14.2	0.9 (52.1)	0.9 (52.1)	36.0
14.9	27.1	14.9	0.9 (53.5)	0.9 (53.5)	37.0
15.6	27.4	15.6	1.0 (55.0)	1.0 (55.0)	38.0
16.3	27.6	16.3	1.0 (56.4)	1.0 (56.4)	39.0
17.0	27.7	17.0	1.0 (57.9)	1.0 (57.9)	40.0
17.7	27.8	17.7	1.0 (59.3)	1.0 (59.3)	41.0
18.4	27.9	18.4	1.1 (60.8)	1.1 (60.8)	42.0
19.1	28.0	19.1	1.1 (62.2)	1.1 (62.2)	43.0

10

20

30

【0 1 1 6】

【表 1 4】

このスレッドのアルファ回転=1.6(90.0)

注:シータおよびファイはラジアン(度)で示す

s	x	y	シータ	ファイ	コスト
0.0	1.0	-0.0	0.0 (2.0)	-0.0(-0.0)	1.0
0.1	2.0	-0.0	0.1 (4.1)	-0.0(-0.0)	2.0
0.2	3.0	-0.0	0.1 (6.1)	-0.0(-0.0)	3.0
0.3	4.0	-0.0	0.1 (8.2)	-0.0(-0.0)	4.0
0.4	5.0	-0.0	0.2 (10.2)	-0.0(-0.0)	5.0
0.6	6.0	-0.0	0.2 (12.3)	-0.0(-0.0)	6.0
0.9	6.9	-0.0	0.3 (14.3)	-0.0(-0.0)	7.0
1.1	7.9	-0.0	0.3 (16.4)	-0.0(-0.0)	8.0
1.4	8.8	-0.0	0.3 (18.4)	-0.0(-0.0)	9.0
1.8	9.8	-0.0	0.4 (20.5)	-0.0(-0.0)	10.0
2.1	10.7	-0.0	0.4 (22.5)	-0.0(-0.0)	11.0
2.5	11.6	-0.0	0.4 (24.6)	-0.0(-0.0)	12.0
3.0	12.5	-0.0	0.5 (26.6)	-0.0(-0.0)	13.0
3.4	13.4	-0.0	0.5 (28.6)	-0.0(-0.0)	14.0
3.9	14.3	-0.0	0.5 (30.7)	-0.0(-0.0)	15.0
4.4	15.1	-0.0	0.6 (32.7)	-0.0(-0.0)	16.0
5.0	16.0	-0.0	0.6 (34.8)	-0.0(-0.0)	17.0
5.6	16.8	-0.0	0.6 (36.8)	-0.0(-0.0)	18.0
6.2	17.6	-0.0	0.7 (38.9)	-0.0(-0.0)	19.0
6.8	18.3	-0.0	0.7 (40.9)	-0.0(-0.0)	20.0
7.5	19.1	-0.0	0.8 (43.0)	-0.0(-0.0)	21.0
8.2	19.8	-0.0	0.8 (45.0)	-0.0(-0.0)	22.0
8.9	20.5	-0.0	0.8 (47.1)	-0.0(-0.0)	23.0
9.7	21.2	-0.0	0.9 (49.1)	-0.0(-0.0)	24.0
10.4	21.8	-0.0	0.9 (51.2)	-0.0(-0.0)	25.0
11.2	22.4	-0.0	0.9 (53.2)	-0.0(-0.0)	26.0
12.0	23.0	-0.0	1.0 (55.2)	-0.0(-0.0)	27.0
12.9	23.6	-0.0	1.0 (57.3)	-0.0(-0.0)	28.0
13.7	24.1	-0.0	1.0 (59.3)	-0.0(-0.0)	29.0
14.6	24.6	-0.0	1.1 (61.4)	-0.0(-0.0)	30.0
15.5	25.0	-0.0	1.1 (63.4)	-0.0(-0.0)	31.0
16.4	25.5	-0.0	1.1 (65.5)	-0.0(-0.0)	32.0
17.3	25.9	-0.0	1.2 (67.5)	-0.0(-0.0)	33.0
18.2	26.2	-0.0	1.2 (69.6)	-0.0(-0.0)	34.0
19.2	26.6	-0.0	1.3 (71.6)	-0.0(-0.0)	35.0
20.1	26.9	-0.0	1.3 (73.7)	-0.0(-0.0)	36.0
21.1	27.1	-0.0	1.3 (75.7)	-0.0(-0.0)	37.0
22.1	27.4	-0.0	1.4 (77.8)	-0.0(-0.0)	38.0
23.0	27.6	-0.0	1.4 (79.8)	-0.0(-0.0)	39.0
24.0	27.7	-0.0	1.4 (81.9)	-0.0(-0.0)	40.0
25.0	27.8	-0.0	1.5 (83.9)	-0.0(-0.0)	41.0
26.0	27.9	-0.0	1.5 (85.9)	-0.0(-0.0)	42.0
27.0	28.0	-0.0	1.5 (88.0)	-0.0(-0.0)	43.0

10

20

30

【表 1 5】

このスレッドのアルファ回転=2.4(135.0)

注:シータおよびファイはラジアン(度)で示す

s	x	y	シータ	ファイ	コスト
0.0	1.0	- 0.0	0.0 (1.4)	-0.0(- 1.4)	1.0
0.1	2.0	- 0.1	0.1 (2.9)	-0.1(- 2.9)	2.0
0.1	3.0	- 0.1	0.1 (4.3)	-0.1(- 4.3)	3.0
0.2	4.0	- 0.2	0.1 (5.8)	-0.1(- 5.8)	4.0
0.3	5.0	- 0.3	0.1 (7.2)	-0.1(- 7.2)	5.0
0.5	6.0	- 0.5	0.2 (8.7)	-0.2(- 8.7)	6.0
0.6	6.9	- 0.6	0.2 (10.1)	-0.2(-10.1)	7.0
0.8	7.9	- 0.8	0.2 (11.6)	-0.2(-11.6)	8.0
1.0	8.8	- 1.0	0.2 (13.0)	-0.2(-13.0)	9.0
1.2	9.8	- 1.2	0.3 (14.5)	-0.3(-14.5)	10.0
1.5	10.7	- 1.5	0.3 (15.9)	-0.3(-15.9)	11.0
1.8	11.6	- 1.8	0.3 (17.4)	-0.3(-17.4)	12.0
2.1	12.5	- 2.1	0.3 (18.8)	-0.3(-18.8)	13.0
2.4	13.4	- 2.4	0.4 (20.3)	-0.4(-20.3)	14.0
2.8	14.3	- 2.8	0.4 (21.7)	-0.4(-21.7)	15.0
3.1	15.1	- 3.1	0.4 (23.2)	-0.4(-23.2)	16.0
3.5	16.0	- 3.5	0.4 (24.6)	-0.4(-24.6)	17.0
4.0	16.8	- 4.0	0.5 (26.0)	-0.5(-26.0)	18.0
4.4	17.6	- 4.4	0.5 (27.5)	-0.5(-27.5)	19.0
4.8	18.3	- 4.8	0.5 (28.9)	-0.5(-28.9)	20.0
5.3	19.1	- 5.3	0.5 (30.4)	-0.5(-30.4)	21.0
5.8	19.8	- 5.8	0.6 (31.8)	-0.6(-31.8)	22.0
6.3	20.5	- 6.3	0.6 (33.3)	-0.6(-33.3)	23.0
6.8	21.2	- 6.8	0.6 (34.7)	-0.6(-34.7)	24.0
7.4	21.8	- 7.4	0.6 (36.2)	-0.6(-36.2)	25.0
7.9	22.4	- 7.9	0.7 (37.6)	-0.7(-37.6)	26.0
8.5	23.0	- 8.5	0.7 (39.1)	-0.7(-39.1)	27.0
9.1	23.6	- 9.1	0.7 (40.5)	-0.7(-40.5)	28.0
9.7	24.1	- 9.7	0.7 (42.0)	-0.7(-42.0)	29.0
10.3	24.6	-10.3	0.8 (43.4)	-0.8(-43.4)	30.0
10.9	25.0	-10.9	0.8 (44.9)	-0.8(-44.9)	31.0
11.6	25.5	-11.6	0.8 (46.3)	-0.8(-46.3)	32.0
12.2	25.9	-12.2	0.8 (47.7)	-0.8(-47.7)	33.0
12.9	26.2	-12.9	0.9 (49.2)	-0.9(-49.2)	34.0
13.6	26.6	-13.6	0.9 (50.6)	-0.9(-50.6)	35.0
14.2	26.9	-14.2	0.9 (52.1)	-0.9(-52.1)	36.0
14.9	27.1	-14.9	0.9 (53.5)	-0.9(-53.5)	37.0
15.6	27.4	-15.6	1.0 (55.0)	-1.0(-55.0)	38.0
16.3	27.6	-16.3	1.0 (56.4)	-1.0(-56.4)	39.0
17.0	27.7	-17.0	1.0 (57.9)	-1.0(-57.9)	40.0
17.7	27.8	-17.7	1.0 (59.3)	-1.0(-59.3)	41.0
18.4	27.9	-18.4	1.1 (60.8)	-1.1(-60.8)	42.0
19.1	28.0	-19.1	1.1 (62.2)	-1.1(-62.2)	43.0

10

20

30

【表 1 6】

このスレッドのアルファ回転=3.1(180.0)

注:シータおよびファイはラジアン(度)で示す

s	x	y	シータ	ファイ	コスト
-0.0	1.0	- 0.0	-0.0 (-0.0)	-0.0 (- 2.0)	1.0
-0.0	2.0	- 0.1	-0.0 (-0.0)	-0.1 (- 4.1)	2.0
-0.0	3.0	- 0.2	-0.0 (-0.0)	-0.1 (- 6.1)	3.0
-0.0	4.0	- 0.3	-0.0 (-0.0)	-0.1 (- 8.2)	4.0
-0.0	5.0	- 0.4	-0.0 (-0.0)	-0.2 (-10.2)	5.0
-0.0	6.0	- 0.6	-0.0 (-0.0)	-0.2 (-12.3)	6.0
-0.0	6.9	- 0.9	-0.0 (-0.0)	-0.3 (-14.3)	7.0
-0.0	7.9	- 1.1	-0.0 (-0.0)	-0.3 (-16.4)	8.0
-0.0	8.8	- 1.4	-0.0 (-0.0)	-0.3 (-18.4)	9.0
-0.0	9.8	- 1.8	-0.0 (-0.0)	-0.4 (-20.5)	10.0
-0.0	10.7	- 2.1	-0.0 (-0.0)	-0.4 (-22.5)	11.0
-0.0	11.6	- 2.5	-0.0 (-0.0)	-0.4 (-24.6)	12.0
-0.0	12.5	- 3.0	-0.0 (-0.0)	-0.5 (-26.6)	13.0
-0.0	13.4	- 3.4	-0.0 (-0.0)	-0.5 (-28.6)	14.0
-0.0	14.3	- 3.9	-0.0 (-0.0)	-0.5 (-30.7)	15.0
-0.0	15.1	- 4.4	-0.0 (-0.0)	-0.6 (-32.7)	16.0
-0.0	16.0	- 5.0	-0.0 (-0.0)	-0.6 (-34.8)	17.0
-0.0	16.8	- 5.6	-0.0 (-0.0)	-0.6 (-36.8)	18.0
-0.0	17.6	- 6.2	-0.0 (-0.0)	-0.7 (-38.9)	19.0
-0.0	18.3	- 6.8	-0.0 (-0.0)	-0.7 (-40.9)	20.0
-0.0	19.1	- 7.5	-0.0 (-0.0)	-0.8 (-43.0)	21.0
-0.0	19.8	- 8.2	-0.0 (-0.0)	-0.8 (-45.0)	22.0
-0.0	20.5	- 8.9	-0.0 (-0.0)	-0.8 (-47.1)	23.0
-0.0	21.2	- 9.7	-0.0 (-0.0)	-0.9 (-49.1)	24.0
-0.0	21.8	-10.4	-0.0 (-0.0)	-0.9 (-51.2)	25.0
-0.0	22.4	-11.2	-0.0 (-0.0)	-0.9 (-53.2)	26.0
-0.0	23.0	-12.0	-0.0 (-0.0)	-1.0 (-55.2)	27.0
-0.0	23.6	-12.9	-0.0 (-0.0)	-1.0 (-57.3)	28.0
-0.0	24.1	-13.7	-0.0 (-0.0)	-1.0 (-59.3)	29.0
-0.0	24.6	-14.6	-0.0 (-0.0)	-1.1 (-61.4)	30.0
-0.0	25.0	-15.5	-0.0 (-0.0)	-1.1 (-63.4)	31.0
-0.0	25.5	-16.4	-0.0 (-0.0)	-1.1 (-65.5)	32.0
-0.0	25.9	-17.3	-0.0 (-0.0)	-1.2 (-67.5)	33.0
-0.0	26.2	-18.2	-0.0 (-0.0)	-1.2 (-69.6)	34.0
-0.0	26.6	-19.2	-0.0 (-0.0)	-1.3 (-71.6)	35.0
-0.0	26.9	-20.1	-0.0 (-0.0)	-1.3 (-73.7)	36.0
-0.0	27.1	-21.1	-0.0 (-0.0)	-1.3 (-75.7)	37.0
-0.0	27.4	-22.1	-0.0 (-0.0)	-1.4 (-77.8)	38.0
-0.0	27.6	-23.0	-0.0 (-0.0)	-1.4 (-79.8)	39.0
-0.0	27.7	-24.0	-0.0 (-0.0)	-1.4 (-81.9)	40.0
-0.0	27.8	-25.0	-0.0 (-0.0)	-1.5 (-83.9)	41.0
-0.0	27.9	-26.0	-0.0 (-0.0)	-1.5 (-85.9)	42.0
-0.0	28.0	-27.0	-0.0 (-0.0)	-1.5 (-88.0)	43.0

【表 17】

このスレッドのアルファ回転=3.9(225.0)

注:シータおよびファイはラジアン(度)で示す

s	x	y	シータ	ファイ	コスト
- 0.0	1.0	- 0.0	-0.0 (- 1.4)	-0.0(- 1.4)	1.0
- 0.1	2.0	- 0.1	-0.1 (- 2.9)	-0.1(- 2.9)	2.0
- 0.1	3.0	- 0.1	-0.1 (- 4.3)	-0.1(- 4.3)	3.0
- 0.2	4.0	- 0.2	-0.1 (- 5.8)	-0.1(- 5.8)	4.0
- 0.3	5.0	- 0.3	-0.1 (- 7.2)	-0.1(- 7.2)	5.0
- 0.5	6.0	- 0.5	-0.2 (- 8.7)	-0.2(- 8.7)	6.0
- 0.6	6.9	- 0.6	-0.2 (-10.1)	-0.2(-10.1)	7.0
- 0.8	7.9	- 0.8	-0.2 (-11.6)	-0.2(-11.6)	8.0
- 1.0	8.8	- 1.0	-0.2 (-13.0)	-0.2(-13.0)	9.0
- 1.2	9.8	- 1.2	-0.3 (-14.5)	-0.3(-14.5)	10.0
- 1.5	10.7	- 1.5	-0.3 (-15.9)	-0.3(-15.9)	11.0
- 1.8	11.6	- 1.8	-0.3 (-17.4)	-0.3(-17.4)	12.0
- 2.1	12.5	- 2.1	-0.3 (-18.8)	-0.3(-18.8)	13.0
- 2.4	13.4	- 2.4	-0.4 (-20.3)	-0.4(-20.3)	14.0
- 2.8	14.3	- 2.8	-0.4 (-21.7)	-0.4(-21.7)	15.0
- 3.1	15.1	- 3.1	-0.4 (-23.2)	-0.4(-23.2)	16.0
- 3.5	16.0	- 3.5	-0.4 (-24.6)	-0.4(-24.6)	17.0
- 4.0	16.8	- 4.0	-0.5 (-26.0)	-0.5(-26.0)	18.0
- 4.4	17.6	- 4.4	-0.5 (-27.5)	-0.5(-27.5)	19.0
- 4.8	18.3	- 4.8	-0.5 (-28.9)	-0.5(-28.9)	20.0
- 5.3	19.1	- 5.3	-0.5 (-30.4)	-0.5(-30.4)	21.0
- 5.8	19.8	- 5.8	-0.6 (-31.8)	-0.6(-31.8)	22.0
- 6.3	20.5	- 6.3	-0.6 (-33.3)	-0.6(-33.3)	23.0
- 6.8	21.2	- 6.8	-0.6 (-34.7)	-0.6(-34.7)	24.0
- 7.4	21.8	- 7.4	-0.6 (-36.2)	-0.6(-36.2)	25.0
- 7.9	22.4	- 7.9	-0.7 (-37.6)	-0.7(-37.6)	26.0
- 8.5	23.0	- 8.5	-0.7 (-39.1)	-0.7(-39.1)	27.0
- 9.1	23.6	- 9.1	-0.7 (-40.5)	-0.7(-40.5)	28.0
- 9.7	24.1	- 9.7	-0.7 (-42.0)	-0.7(-42.0)	29.0
-10.3	24.6	-10.3	-0.8 (-43.4)	-0.8(-43.4)	30.0
-10.9	25.0	-10.9	-0.8 (-44.9)	-0.8(-44.9)	31.0
-11.6	25.5	-11.6	-0.8 (-46.3)	-0.8(-46.3)	32.0
-12.2	25.9	-12.2	-0.8 (-47.7)	-0.8(-47.7)	33.0
-12.9	26.2	-12.9	-0.9 (-49.2)	-0.9(-49.2)	34.0
-13.6	26.6	-13.6	-0.9 (-50.6)	-0.9(-50.6)	35.0
-14.2	26.9	-14.2	-0.9 (-52.1)	-0.9(-52.1)	36.0
-14.9	27.1	-14.9	-0.9 (-53.5)	-0.9(-53.5)	37.0
-15.6	27.4	-15.6	-1.0 (-55.0)	-1.0(-55.0)	38.0
-16.3	27.6	-16.3	-1.0 (-56.4)	-1.0(-56.4)	39.0
-17.0	27.7	-17.0	-1.0 (-57.9)	-1.0(-57.9)	40.0
-17.7	27.8	-17.7	-1.0 (-59.3)	-1.0(-59.3)	41.0
-18.4	27.9	-18.4	-1.1 (-60.8)	-1.1(-60.8)	42.0
-19.1	28.0	-19.1	-1.1 (-62.2)	-1.1(-62.2)	43.0

【表 18】

このスレッドのアルファ回転=4.7(270.0)
 注:シータおよびファイはラジアン(度)で示す

s	x	y	シータ	ファイ	コスト
- 0.0	1.0	0.0	-0.0 (- 2.0)	0.0(0.0)	1.0
- 0.1	2.0	0.0	-0.1 (- 4.1)	0.0(0.0)	2.0
- 0.2	3.0	0.0	-0.1 (- 6.1)	0.0(0.0)	3.0
- 0.3	4.0	0.0	-0.1 (- 8.2)	0.0(0.0)	4.0
- 0.4	5.0	0.0	-0.2 (-10.2)	0.0(0.0)	5.0
- 0.6	6.0	0.0	-0.2 (-12.3)	0.0(0.0)	6.0
- 0.9	6.9	0.0	-0.3 (-14.3)	0.0(0.0)	7.0
- 1.1	7.9	0.0	-0.3 (-16.4)	0.0(0.0)	8.0
- 1.4	8.8	0.0	-0.3 (-18.4)	0.0(0.0)	9.0
- 1.8	9.8	0.0	-0.4 (-20.5)	0.0(0.0)	10.0
- 2.1	10.7	0.0	-0.4 (-22.5)	0.0(0.0)	11.0
- 2.5	11.6	0.0	-0.4 (-24.6)	0.0(0.0)	12.0
- 3.0	12.5	0.0	-0.5 (-26.6)	0.0(0.0)	13.0
- 3.4	13.4	0.0	-0.5 (-28.6)	0.0(0.0)	14.0
- 3.9	14.3	0.0	-0.5 (-30.7)	0.0(0.0)	15.0
- 4.4	15.1	0.0	-0.6 (-32.7)	0.0(0.0)	16.0
- 5.0	16.0	0.0	-0.6 (-34.8)	0.0(0.0)	17.0
- 5.6	16.8	0.0	-0.6 (-36.8)	0.0(0.0)	18.0
- 6.2	17.6	0.0	-0.7 (-38.9)	0.0(0.0)	19.0
- 6.8	18.3	0.0	-0.7 (-40.9)	0.0(0.0)	20.0
- 7.5	19.1	0.0	-0.8 (-43.0)	0.0(0.0)	21.0
- 8.2	19.8	0.0	-0.8 (-45.0)	0.0(0.0)	22.0
- 8.9	20.5	0.0	-0.8 (-47.1)	0.0(0.0)	23.0
- 9.7	21.2	0.0	-0.9 (-49.1)	0.0(0.0)	24.0
-10.4	21.8	0.0	-0.9 (-51.2)	0.0(0.0)	25.0
-11.2	22.4	0.0	-0.9 (-53.2)	0.0(0.0)	26.0
-12.0	23.0	0.0	-1.0 (-55.2)	0.0(0.0)	27.0
-12.9	23.6	0.0	-1.0 (-57.3)	0.0(0.0)	28.0
-13.7	24.1	0.0	-1.0 (-59.3)	0.0(0.0)	29.0
-14.6	24.6	0.0	-1.1 (-61.4)	0.0(0.0)	30.0
-15.5	25.0	0.0	-1.1 (-63.4)	0.0(0.0)	31.0
-16.4	25.5	0.0	-1.1 (-65.5)	0.0(0.0)	32.0
-17.3	25.9	0.0	-1.2 (-67.5)	0.0(0.0)	33.0
-18.2	26.2	0.0	-1.2 (-69.6)	0.0(0.0)	34.0
-19.2	26.6	0.0	-1.3 (-71.6)	0.0(0.0)	35.0
-20.1	26.9	0.0	-1.3 (-73.7)	0.0(0.0)	36.0
-21.1	27.1	0.0	-1.3 (-75.7)	0.0(0.0)	37.0
-22.1	27.4	0.0	-1.4 (-77.8)	0.0(0.0)	38.0
-23.0	27.6	0.0	-1.4 (-79.8)	0.0(0.0)	39.0
-24.0	27.7	0.0	-1.4 (-81.9)	0.0(0.0)	40.0
-25.0	27.8	0.0	-1.5 (-83.9)	0.0(0.0)	41.0
-26.0	27.9	0.0	-1.5 (-85.9)	0.0(0.0)	42.0
-27.0	28.0	0.0	-1.5 (-88.0)	0.0(0.0)	43.0

【0 1 2 1】

10

20

30

40

【表 1 9】

このスレッドのアルファ回転=5.5(315.0)

注:シータおよびファイはラジアン(度)で示す

s	x	y	シータ	ファイ	コスト
- 0.0	1.0	0.0	-0.0 (- 1.4)	0.0(1.4)	1.0
- 0.1	2.0	0.1	-0.1 (- 2.9)	0.1(2.9)	2.0
- 0.1	3.0	0.1	-0.1 (- 4.3)	0.1(4.3)	3.0
- 0.2	4.0	0.2	-0.1 (- 5.8)	0.1(5.8)	4.0
- 0.3	5.0	0.3	-0.1 (- 7.2)	0.1(7.2)	5.0
- 0.5	6.0	0.5	-0.2 (- 8.7)	0.2(8.7)	6.0
- 0.6	6.9	0.6	-0.2 (-10.1)	0.2(10.1)	7.0
- 0.8	7.9	0.8	-0.2 (-11.6)	0.2(11.6)	8.0
- 1.0	8.8	1.0	-0.2 (-13.0)	0.2(13.0)	9.0
- 1.2	9.8	1.2	-0.3 (-14.5)	0.3(14.5)	10.0
- 1.5	10.7	1.5	-0.3 (-15.9)	0.3(15.9)	11.0
- 1.8	11.6	1.8	-0.3 (-17.4)	0.3(17.4)	12.0
- 2.1	12.5	2.1	-0.3 (-18.8)	0.3(18.8)	13.0
- 2.4	13.4	2.4	-0.4 (-20.3)	0.4(20.3)	14.0
- 2.8	14.3	2.8	-0.4 (-21.7)	0.4(21.7)	15.0
- 3.1	15.1	3.1	-0.4 (-23.2)	0.4(23.2)	16.0
- 3.5	16.0	3.5	-0.4 (-24.6)	0.4(24.6)	17.0
- 4.0	16.8	4.0	-0.5 (-26.0)	0.5(26.0)	18.0
- 4.4	17.6	4.4	-0.5 (-27.5)	0.5(27.5)	19.0
- 4.8	18.3	4.8	-0.5 (-28.9)	0.5(28.9)	20.0
- 5.3	19.1	5.3	-0.5 (-30.4)	0.5(30.4)	21.0
- 5.8	19.8	5.8	-0.6 (-31.8)	0.6(31.8)	22.0
- 6.3	20.5	6.3	-0.6 (-33.3)	0.6(33.3)	23.0
- 6.8	21.2	6.8	-0.6 (-34.7)	0.6(34.7)	24.0
- 7.4	21.8	7.4	-0.6 (-36.2)	0.6(36.2)	25.0
- 7.9	22.4	7.9	-0.7 (-37.6)	0.7(37.6)	26.0
- 8.5	23.0	8.5	-0.7 (-39.1)	0.7(39.1)	27.0
- 9.1	23.6	9.1	-0.7 (-40.5)	0.7(40.5)	28.0
- 9.7	24.1	9.7	-0.7 (-42.0)	0.7(42.0)	29.0
-10.3	24.6	10.3	-0.8 (-43.4)	0.8(43.4)	30.0
-10.9	25.0	10.9	-0.8 (-44.9)	0.8(44.9)	31.0
-11.6	25.5	11.6	-0.8 (-46.3)	0.8(46.3)	32.0
-12.2	25.9	12.2	-0.8 (-47.7)	0.8(47.7)	33.0
-12.9	26.2	12.9	-0.9 (-49.2)	0.9(49.2)	34.0
-13.6	26.6	13.6	-0.9 (-50.6)	0.9(50.6)	35.0
-14.2	26.9	14.2	-0.9 (-52.1)	0.9(52.1)	36.0
-14.9	27.1	14.9	-0.9 (-53.5)	0.9(53.5)	37.0
-15.6	27.4	15.6	-1.0 (-55.0)	1.0(55.0)	38.0
-16.3	27.6	16.3	-1.0 (-56.4)	1.0(56.4)	39.0
-17.0	27.7	17.0	-1.0 (-57.9)	1.0(57.9)	40.0
-17.7	27.8	17.7	-1.0 (-59.3)	1.0(59.3)	41.0
-18.4	27.9	18.4	-1.1 (-60.8)	1.1(60.8)	42.0
-19.1	28.0	19.1	-1.1 (-62.2)	1.1(62.2)	43.0

10

20

30

【0 1 2 2】

半径14mmの近傍の生成

40

【表 2 0】

このスレッドのアルファ回転=0.0(0.0)

注:シータおよびファイはラジアン(度)で示す

s	x	y	シータ	ファイ	コスト
0.0	1.0	0.0	0.0 (0.0)	0.1 (4.1)	7.0
0.0	2.0	0.1	0.0 (0.0)	0.1 (8.2)	14.0
0.0	3.0	0.3	0.0 (0.0)	0.2 (12.3)	21.0
0.0	3.9	0.6	0.0 (0.0)	0.3 (16.4)	28.0
0.0	4.9	0.9	0.0 (0.0)	0.4 (20.5)	35.0
0.0	5.8	1.3	0.0 (0.0)	0.4 (24.6)	42.0
0.0	6.7	1.7	0.0 (0.0)	0.5 (28.6)	49.0
0.0	7.6	2.2	0.0 (0.0)	0.6 (32.7)	56.0
0.0	8.4	2.8	0.0 (0.0)	0.6 (36.8)	63.0
0.0	9.2	3.4	0.0 (0.0)	0.7 (40.9)	70.0
0.0	9.9	4.1	0.0 (0.0)	0.8 (45.0)	77.0
0.0	10.6	4.8	0.0 (0.0)	0.9 (49.1)	84.0
0.0	11.2	5.6	0.0 (0.0)	0.9 (53.2)	91.0
0.0	11.8	6.4	0.0 (0.0)	1.0 (57.3)	98.0
0.0	12.3	7.3	0.0 (0.0)	1.1 (61.4)	105.0
0.0	12.7	8.2	0.0 (0.0)	1.1 (65.5)	112.0
0.0	13.1	9.1	0.0 (0.0)	1.2 (69.6)	119.0
0.0	13.4	10.1	0.0 (0.0)	1.3 (73.7)	126.0
0.0	13.7	11.0	0.0 (0.0)	1.4 (77.8)	133.0
0.0	13.9	12.0	0.0 (0.0)	1.4 (81.9)	140.0
0.0	14.0	13.0	0.0 (0.0)	1.5 (85.9)	147.0

10

20

【 0 1 2 3】

【表 2 1】

このスレッドのアルファ回転=0.8(45.0)

注:シータおよびファイはラジアン(度)で示す

s	x	y	シータ	ファイ	コスト
0.0	1.0	0.0	0.1 (2.9)	0.1 (2.9)	7.0
0.1	2.0	0.1	0.1 (5.8)	0.1 (5.8)	14.0
0.2	3.0	0.2	0.2 (8.7)	0.2 (8.7)	21.0
0.4	3.9	0.4	0.2 (11.6)	0.2 (11.6)	28.0
0.6	4.9	0.6	0.3 (14.5)	0.3 (14.5)	35.0
0.9	5.8	0.9	0.3 (17.4)	0.3 (17.4)	42.0
1.2	6.7	1.2	0.4 (20.3)	0.4 (20.3)	49.0
1.6	7.6	1.6	0.4 (23.2)	0.4 (23.2)	56.0
2.0	8.4	2.0	0.5 (26.0)	0.5 (26.0)	63.0
2.4	9.2	2.4	0.5 (28.9)	0.5 (28.9)	70.0
2.9	9.9	2.9	0.6 (31.8)	0.6 (31.8)	77.0
3.4	10.6	3.4	0.6 (34.7)	0.6 (34.7)	84.0
4.0	11.2	4.0	0.7 (37.6)	0.7 (37.6)	91.0
4.6	11.8	4.6	0.7 (40.5)	0.7 (40.5)	98.0
5.2	12.3	5.2	0.8 (43.4)	0.8 (43.4)	105.0
5.8	12.7	5.8	0.8 (46.3)	0.8 (46.3)	112.0
6.4	13.1	6.4	0.9 (49.2)	0.9 (49.2)	119.0
7.1	13.4	7.1	0.9 (52.1)	0.9 (52.1)	126.0
7.8	13.7	7.8	1.0 (55.0)	1.0 (55.0)	133.0
8.5	13.9	8.5	1.0 (57.9)	1.0 (57.9)	140.0
9.2	14.0	9.2	1.1 (60.8)	1.1 (60.8)	147.0

30

40

【 0 1 2 4】

【表 2 2】

このスレッドのアルファ回転=1.6(90.0)

注:シータおよびファイはラジアン(度)で示す

s	x	y	シータ	ファイ	コスト
0.0	1.0	-0.0	0.1 (4.1)	-0.0(-0.0)	7.0
0.1	2.0	-0.0	0.1 (8.2)	-0.0(-0.0)	14.0
0.3	3.0	-0.0	0.2 (12.3)	-0.0(-0.0)	21.0
0.6	3.9	-0.0	0.3 (16.4)	-0.0(-0.0)	28.0
0.9	4.9	-0.0	0.4 (20.5)	-0.0(-0.0)	35.0
1.3	5.8	-0.0	0.4 (24.6)	-0.0(-0.0)	42.0
1.7	6.7	-0.0	0.5 (28.6)	-0.0(-0.0)	49.0
2.2	7.6	-0.0	0.6 (32.7)	-0.0(-0.0)	56.0
2.8	8.4	-0.0	0.6 (36.8)	-0.0(-0.0)	63.0
3.4	9.2	-0.0	0.7 (40.9)	-0.0(-0.0)	70.0
4.1	9.9	-0.0	0.8 (45.0)	-0.0(-0.0)	77.0
4.8	10.6	-0.0	0.9 (49.1)	-0.0(-0.0)	84.0
5.6	11.2	-0.0	0.9 (53.2)	-0.0(-0.0)	91.0
6.4	11.8	-0.0	1.0 (57.3)	-0.0(-0.0)	98.0
7.3	12.3	-0.0	1.1 (61.4)	-0.0(-0.0)	105.0
8.2	12.7	-0.0	1.1 (65.5)	-0.0(-0.0)	112.0
9.1	13.1	-0.0	1.2 (69.6)	-0.0(-0.0)	119.0
10.1	13.4	-0.0	1.3 (73.7)	-0.0(-0.0)	126.0
11.0	13.7	-0.0	1.4 (77.8)	-0.0(-0.0)	133.0
12.0	13.9	-0.0	1.4 (81.9)	-0.0(-0.0)	140.0
13.0	14.0	-0.0	1.5 (85.9)	-0.0(-0.0)	147.0

10

20

【0 1 2 5】

【表 2 3】

このスレッドのアルファ回転=2.4(135.0)

注:シータおよびファイはラジアン(度)で示す

s	x	y	シータ	ファイ	コスト
0.0	1.0	-0.0	0.1 (2.9)	-0.1(- 2.9)	7.0
0.1	2.0	-0.1	0.1 (5.8)	-0.1(- 5.8)	14.0
0.2	3.0	-0.2	0.2 (8.7)	-0.2(- 8.7)	21.0
0.4	3.9	-0.4	0.2 (11.6)	-0.2(-11.6)	28.0
0.6	4.9	-0.6	0.3 (14.5)	-0.3(-14.5)	35.0
0.9	5.8	-0.9	0.3 (17.4)	-0.3(-17.4)	42.0
1.2	6.7	-1.2	0.4 (20.3)	-0.4(-20.3)	49.0
1.6	7.6	-1.6	0.4 (23.2)	-0.4(-23.2)	56.0
2.0	8.4	-2.0	0.5 (26.0)	-0.5(-26.0)	63.0
2.4	9.2	-2.4	0.5 (28.9)	-0.5(-28.9)	70.0
2.9	9.9	-2.9	0.6 (31.8)	-0.6(-31.8)	77.0
3.4	10.6	-3.4	0.6 (34.7)	-0.6(-34.7)	84.0
4.0	11.2	-4.0	0.7 (37.6)	-0.7(-37.6)	91.0
4.6	11.8	-4.6	0.7 (40.5)	-0.7(-40.5)	98.0
5.2	12.3	-5.2	0.8 (43.4)	-0.8(-43.4)	105.0
5.8	12.7	-5.8	0.8 (46.3)	-0.8(-46.3)	112.0
6.4	13.1	-6.4	0.9 (49.2)	-0.9(-49.2)	119.0
7.1	13.4	-7.1	0.9 (52.1)	-0.9(-52.1)	126.0
7.8	13.7	-7.8	1.0 (55.0)	-1.0(-55.0)	133.0
8.5	13.9	-8.5	1.0 (57.9)	-1.0(-57.9)	140.0
9.2	14.0	-9.2	1.1 (60.8)	-1.1(-60.8)	147.0

30

40

【0 1 2 6】

【表 2 4】

このスレッドのアルファ回転=3.1(180.0)

注:シータおよびファイはラジアン(度)で示す

s	x	y	シータ	ファイ	コスト
-0.0	1.0	- 0.0	-0.0 (-0.0)	-0.1 (- 4.1)	7.0
-0.0	2.0	- 0.1	-0.0 (-0.0)	-0.1 (- 8.2)	14.0
-0.0	3.0	- 0.3	-0.0 (-0.0)	-0.2 (-12.3)	21.0
-0.0	3.9	- 0.6	-0.0 (-0.0)	-0.3 (-16.4)	28.0
-0.0	4.9	- 0.9	-0.0 (-0.0)	-0.4 (-20.5)	35.0
-0.0	5.8	- 1.3	-0.0 (-0.0)	-0.4 (-24.6)	42.0
-0.0	6.7	- 1.7	-0.0 (-0.0)	-0.5 (-28.6)	49.0
-0.0	7.6	- 2.2	-0.0 (-0.0)	-0.6 (-32.7)	56.0
-0.0	8.4	- 2.8	-0.0 (-0.0)	-0.6 (-36.8)	63.0
-0.0	9.2	- 3.4	-0.0 (-0.0)	-0.7 (-40.9)	70.0
-0.0	9.9	- 4.1	-0.0 (-0.0)	-0.8 (-45.0)	77.0
-0.0	10.6	- 4.8	-0.0 (-0.0)	-0.9 (-49.1)	84.0
-0.0	11.2	- 5.6	-0.0 (-0.0)	-0.9 (-53.2)	91.0
-0.0	11.8	- 6.4	-0.0 (-0.0)	-1.0 (-57.3)	98.0
-0.0	12.3	- 7.3	-0.0 (-0.0)	-1.1 (-61.4)	105.0
-0.0	12.7	- 8.2	-0.0 (-0.0)	-1.1 (-65.5)	112.0
-0.0	13.1	- 9.1	-0.0 (-0.0)	-1.2 (-69.6)	119.0
-0.0	13.4	-10.1	-0.0 (-0.0)	-1.3 (-73.7)	126.0
-0.0	13.7	-11.0	-0.0 (-0.0)	-1.4 (-77.8)	133.0
-0.0	13.9	-12.0	-0.0 (-0.0)	-1.4 (-81.9)	140.0
-0.0	14.0	-13.0	-0.0 (-0.0)	-1.5 (-85.9)	147.0

10

20

【 0 1 2 7】

【表 2 5】

このスレッドのアルファ回転=3.9(225.0)

注:シータおよびファイはラジアン(度)で示す

s	x	y	シータ	ファイ	コスト
-0.0	1.0	-0.0	-0.1 (- 2.9)	-0.1 (- 2.9)	7.0
-0.1	2.0	-0.1	-0.1 (- 5.8)	-0.1 (- 5.8)	14.0
-0.2	3.0	-0.2	-0.2 (- 8.7)	-0.2 (- 8.7)	21.0
-0.4	3.9	-0.4	-0.2 (-11.6)	-0.2 (-11.6)	28.0
-0.6	4.9	-0.6	-0.3 (-14.5)	-0.3 (-14.5)	35.0
-0.9	5.8	-0.9	-0.3 (-17.4)	-0.3 (-17.4)	42.0
-1.2	6.7	-1.2	-0.4 (-20.3)	-0.4 (-20.3)	49.0
-1.6	7.6	-1.6	-0.4 (-23.2)	-0.4 (-23.2)	56.0
-2.0	8.4	-2.0	-0.5 (-26.0)	-0.5 (-26.0)	63.0
-2.4	9.2	-2.4	-0.5 (-28.9)	-0.5 (-28.9)	70.0
-2.9	9.9	-2.9	-0.6 (-31.8)	-0.6 (-31.8)	77.0
-3.4	10.6	-3.4	-0.6 (-34.7)	-0.6 (-34.7)	84.0
-4.0	11.2	-4.0	-0.7 (-37.6)	-0.7 (-37.6)	91.0
-4.6	11.8	-4.6	-0.7 (-40.5)	-0.7 (-40.5)	98.0
-5.2	12.3	-5.2	-0.8 (-43.4)	-0.8 (-43.4)	105.0
-5.8	12.7	-5.8	-0.8 (-46.3)	-0.8 (-46.3)	112.0
-6.4	13.1	-6.4	-0.9 (-49.2)	-0.9 (-49.2)	119.0
-7.1	13.4	-7.1	-0.9 (-52.1)	-0.9 (-52.1)	126.0
-7.8	13.7	-7.8	-1.0 (-55.0)	-1.0 (-55.0)	133.0
-8.5	13.9	-8.5	-1.0 (-57.9)	-1.0 (-57.9)	140.0
-9.2	14.0	-9.2	-1.1 (-60.8)	-1.1 (-60.8)	147.0

30

40

【 0 1 2 8】

【表 2 6】

このスレッドのアルファ回転=4.7(270.0)

注:シータおよびファイはラジアン(度)で示す

s	x	y	シータ	ファイ	コスト
- 0.0	1.0	0.0	-0.1 (- 4.1)	0.0(0.0)	7.0
- 0.1	2.0	0.0	-0.1 (- 8.2)	0.0(0.0)	14.0
- 0.3	3.0	0.0	-0.2 (-12.3)	0.0(0.0)	21.0
- 0.6	3.9	0.0	-0.3 (-16.4)	0.0(0.0)	28.0
- 0.9	4.9	0.0	-0.4 (-20.5)	0.0(0.0)	35.0
- 1.3	5.8	0.0	-0.4 (-24.6)	0.0(0.0)	42.0
- 1.7	6.7	0.0	-0.5 (-28.6)	0.0(0.0)	49.0
- 2.2	7.6	0.0	-0.6 (-32.7)	0.0(0.0)	56.0
- 2.8	8.4	0.0	-0.6 (-36.8)	0.0(0.0)	63.0
- 3.4	9.2	0.0	-0.7 (-40.9)	0.0(0.0)	70.0
- 4.1	9.9	0.0	-0.8 (-45.0)	0.0(0.0)	77.0
- 4.8	10.6	0.0	-0.9 (-49.1)	0.0(0.0)	84.0
- 5.6	11.2	0.0	-0.9 (-53.2)	0.0(0.0)	91.0
- 6.4	11.8	0.0	-1.0 (-57.3)	0.0(0.0)	98.0
- 7.3	12.3	0.0	-1.1 (-61.4)	0.0(0.0)	105.0
- 8.2	12.7	0.0	-1.1 (-65.5)	0.0(0.0)	112.0
- 9.1	13.1	0.0	-1.2 (-69.6)	0.0(0.0)	119.0
-10.1	13.4	0.0	-1.3 (-73.7)	0.0(0.0)	126.0
-11.0	13.7	0.0	-1.4 (-77.8)	0.0(0.0)	133.0
-12.0	13.9	0.0	-1.4 (-81.9)	0.0(0.0)	140.0
-13.0	14.0	0.0	-1.5 (-85.9)	0.0(0.0)	147.0

10

20

【 0 1 2 9】

【表 2 7】

このスレッドのアルファ回転=5.5(315.0)

注:シータおよびファイはラジアン(度)で示す

s	x	y	シータ	ファイ	コスト
-0.0	1.0	0.0	-0.1 (- 2.9)	0.1(2.9)	7.0
-0.1	2.0	0.1	-0.1 (- 5.8)	0.1(5.8)	14.0
-0.2	3.0	0.2	-0.2 (- 8.7)	0.2(8.7)	21.0
-0.4	3.9	0.4	-0.2 (-11.6)	0.2(11.6)	28.0
-0.6	4.9	0.6	-0.3 (-14.5)	0.3(14.5)	35.0
-0.9	5.8	0.9	-0.3 (-17.4)	0.3(17.4)	42.0
-1.2	6.7	1.2	-0.4 (-20.3)	0.4(20.3)	49.0
-1.6	7.6	1.6	-0.4 (-23.2)	0.4(23.2)	56.0
-2.0	8.4	2.0	-0.5 (-26.0)	0.5(26.0)	63.0
-2.4	9.2	2.4	-0.5 (-28.9)	0.5(28.9)	70.0
-2.9	9.9	2.9	-0.6 (-31.8)	0.6(31.8)	77.0
-3.4	10.6	3.4	-0.6 (-34.7)	0.6(34.7)	84.0
-4.0	11.2	4.0	-0.7 (-37.6)	0.7(37.6)	91.0
-4.6	11.8	4.6	-0.7 (-40.5)	0.7(40.5)	98.0
-5.2	12.3	5.2	-0.8 (-43.4)	0.8(43.4)	105.0
-5.8	12.7	5.8	-0.8 (-46.3)	0.8(46.3)	112.0
-6.4	13.1	6.4	-0.9 (-49.2)	0.9(49.2)	119.0
-7.1	13.4	7.1	-0.9 (-52.1)	0.9(52.1)	126.0
-7.8	13.7	7.8	-1.0 (-55.0)	1.0(55.0)	133.0
-8.5	13.9	8.5	-1.0 (-57.9)	1.0(57.9)	140.0
-9.2	14.0	9.2	-1.1 (-60.8)	1.1(60.8)	147.0

30

40

【図面の簡単な説明】

【 0 1 3 0】

【図 1】 気管支鏡を示す図である。

【図 2】 離散化されたX、YおよびZ方向内での各位置における配位を有する3D配位空間（200）を示す図である。

【図 3】 気管支鏡の近傍の一部を示す図である。

50

【図4】気管支鏡の基本的な機能を記述する名目近傍を示す図である。

【図5】複数の半径を含む気管支鏡の類似の3D近傍を示す図である。

【図6】気管支鏡の名目近傍の線および弧ならびに種々のスレッドを形成するための弧のそれぞれの回転を生成するソフトウェアを示す図である。

【図7】近傍者の優先を含み、スレッドごとに近傍を管理するようにカスタマイズされた、「シード・ノード」から「ゴール」への最適経路の決定のためのA*アルゴリズムの流れ図を示す図である。

【図8】諸点の回転を達成するソフトウェアを示す図である。

【図9】気管および気管支を通る気管支鏡のための経路を示す図である。

【図10】カテーテルを示す図である。

10

【図11】心臓アブレーションのために手動で位置付けされたカテーテルを示す図である。

【図12】本発明に基づくカテーテル経路計画立案活動のためのコスト波伝搬のための重みを示す図である。

【図13】カテーテルの基本的機能を記述する名目近傍の一部を示す図である。

【図14】カテーテルの先端の位置および配向における変化を含む、カテーテルについての諸ノードの名目近傍を示す図である。

【図15】ベベルのある針を示す図である。

【図16】本発明に基づく経路計画立案のためのシステムを示す図である。

【図17】本発明に基づく経路計画立案を実行する装置を示す図である。

20

【図1】

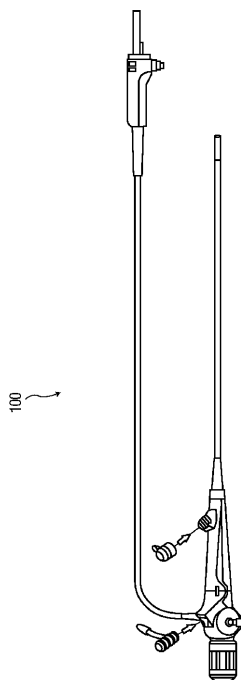


FIG. 1

【図2】

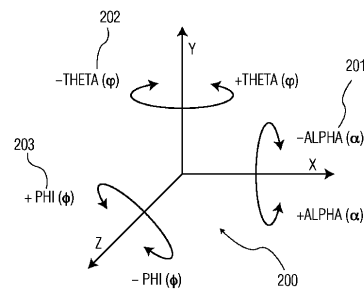


FIG. 2

【図3】

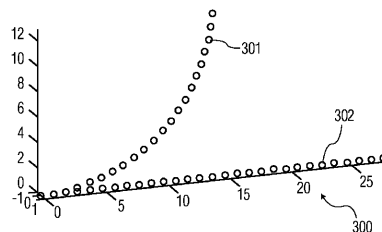


FIG. 3

【図 4】

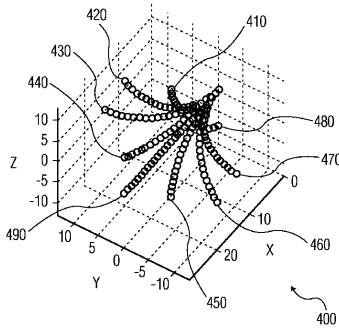


FIG. 4

【図 5】

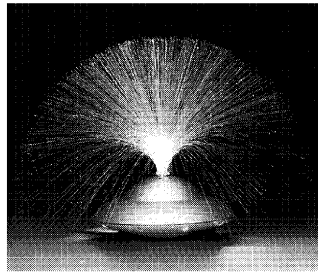


FIG. 5

【図 6】

```
//ステップ1: まっすぐにはいる
for(t=1; entry=0; entry < MAX_THREAD_ENTRY; t++, entry++){
  //tは(直線的に)離れたステップ数
  nominal[0][entry].n.x=t;
  nominal[0][entry].n.y=0;
  nominal[0][entry].n.s=0;
  nominal[0][entry].alpha=0;
  nominal[0][entry].theta=0;
  nominal[0][entry].phi=0;

  //x軸に沿った点
  nominal[0][entry].cost=t*weight(STRAIGHT);
  //重みをかける。気管支鏡=1。カテーテルの例については:
  //まっすぐな近傍者は使用せず。それらは
  //あまりに望ましくないため。重みを非常に大きく設定する可。
}

//ステップ2: 均等に離散化された角から導出される点からなる
//90度の弧を生成。注: tは角度
for(t=3*PI/2 + angle_increment; entry=0; t<PI*2; t+=angle_increment, entry++){
  for(i=1; i < TOTAL_THREADS; i++){
    //弧スレッドは1..(TOTAL_THREADS-1)と番号付けられる
    nominal[i][entry].n.x=radius*cos(t);
    nominal[i][entry].n.y=radius*(1+sin(t));
    //ゆっくり始まって0から1になるように
    //正弦曲線を上にずらす
    nominal[i][entry].n.s=0;

    rotation_of_this_thread = (2*PI/NUM_ARC_THREADS)*(i-1);
    nominal[i][entry].n =
      rotateX(nominal[i][entry].n, rotation_of_this_thread);

    alpha = (entry+1) * angle_increment;

    nominal[i][entry].cost= alpha * radius * weight(radius);
    //arclength = radius * theta(in radians) * weight
    //この特定の半径について重みを計算。
    //気管支鏡なら典型的には1。
    //カテーテルについては1から大きな数まで変化がある。

    nominal[i][entry].alpha = alpha;
    nominal[i][entry].theta = alpha * sin(rotation_of_this_thread);
    nominal[i][entry].phi = alpha * cos(rotation_of_this_thread);
    //tが行った掃引=tangent(オフセット角)
  }
}
```

【図 7】

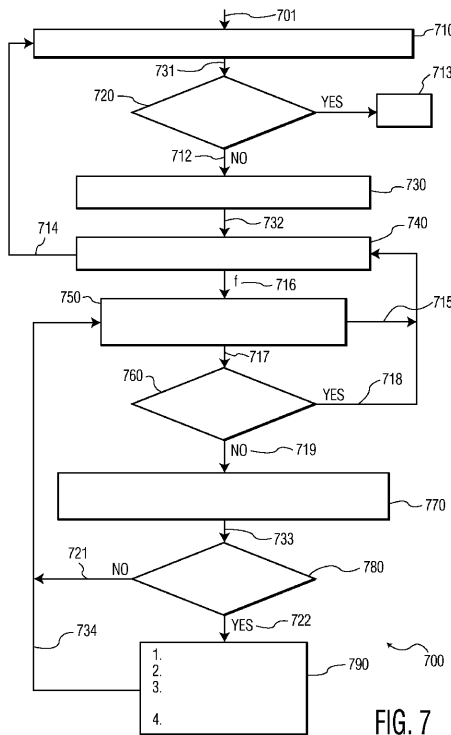


FIG. 7

【図 8】

```
POINT_STRUCT rotateX(POINT_STRUCT a, double theta)
// 回転は連続的で、倍精度数を返す
{
  POINT_STRUCT returned_point;

  returned_point.x=a.x;
  // x' = x
  returned_point.y=cos(theta)*a.y - sin(theta)*a.s;
  // y' = y*cos q - z*sin q
  returned_point.s= sin(theta)*a.y + cos(theta)*a.s;
  // z' = y*sin q + z*cos q
  return returned_point;
}

POINT_STRUCT rotateY(POINT_STRUCT a, double theta)
// 回転は連続的で、倍精度数を返す
{
  POINT_STRUCT returned_point;

  returned_point.x=sin(theta)*a.s + cos(theta)*a.x;
  // x' = z*sin q + x*cos q
  returned_point.y=a.y; // y' = y
  returned_point.s=cos(theta)*a.s-sin(theta)*a.x;
  // z' = z*cos q - x*sin q
  return returned_point;
}

POINT_STRUCT rotateZ(POINT_STRUCT a, double theta)
// 回転は連続的で、倍精度数を返す
{
  POINT_STRUCT returned_point;

  returned_point.x=cos(theta)*a.x-sin(theta)*a.y;
  // x' = x*cos q - y*sin q
  returned_point.y= sin(theta)*a.x+cos(theta)*a.y;
  // y' = x*sin q + y*cos q
  returned_point.s=a.s;
  // z' = z
  return returned_point;
}
```

800

【図 9】

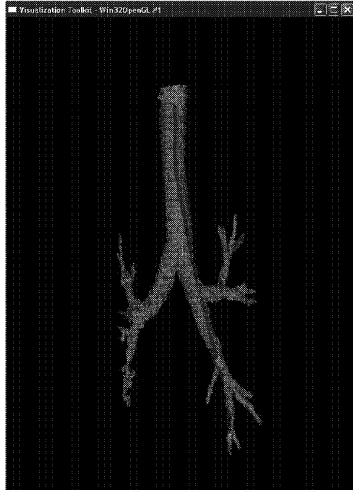


FIG. 9

900

【図 10】

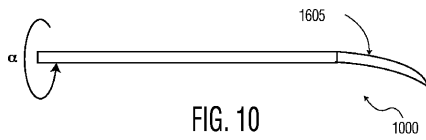


FIG. 10

1000

【図 13】

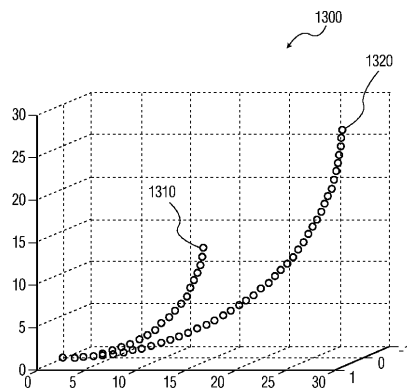
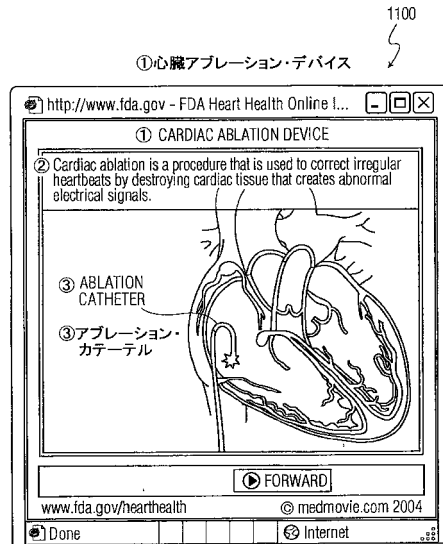


FIG. 13

【図 11】



①心臓アブレーション・デバイス

1100

②心臓アブレーションは、異常な電気信号を生成する心臓組織を破壊することによって不規則な心拍を正すために使われる手順です。

【図 12】

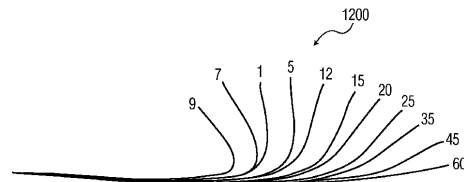


FIG. 12

【図 14】

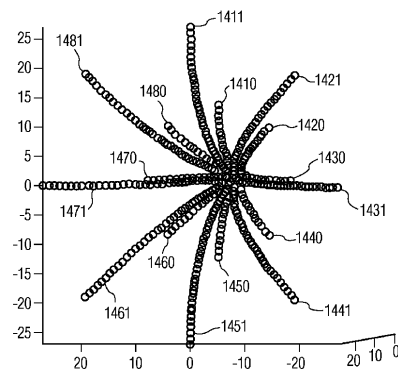


FIG. 14

【図 15】

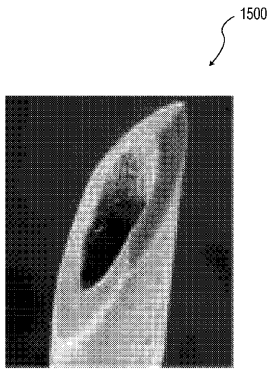


FIG. 15

【図 16】

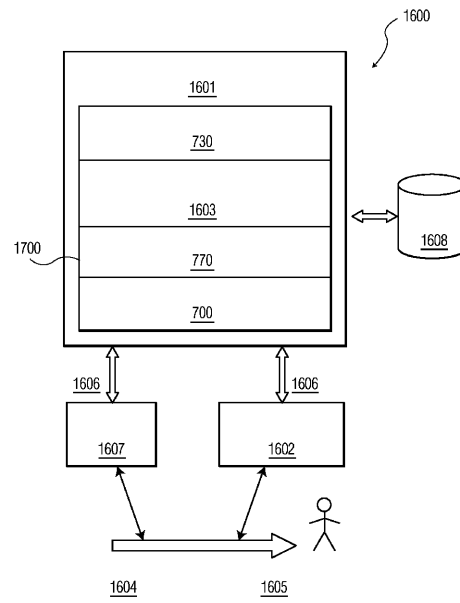


FIG. 16

【図 17】

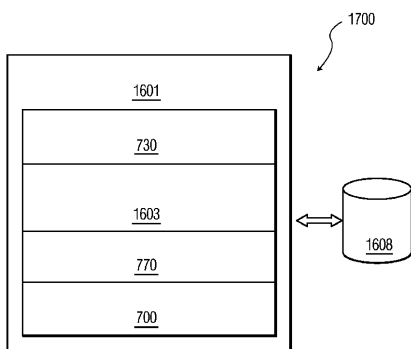


FIG. 17

フロントページの続き

- (72)発明者 トロヴァット, カレン アイ
アメリカ合衆国 ニューヨーク州 10510-8001 ブライアクリフ・マナー スカーボロ
ウ ロード 345 ピー・オー・ボックス 3001
- (72)発明者 コーエン・ソラル, エリック
アメリカ合衆国 ニューヨーク州 10510-8001 ブライアクリフ・マナー スカーボロ
ウ ロード 345 ピー・オー・ボックス 3001
- (72)発明者 ステイ, ダグラス サマーズ
アメリカ合衆国 ニューヨーク州 10510-8001 ブライアクリフ・マナー スカーボロ
ウ ロード 345 ピー・オー・ボックス 3001

審査官 濱本 禎広

- (56)参考文献 特開平01-205205 (JP, A)
特開平11-120327 (JP, A)
特開2005-131319 (JP, A)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
A61B1/00-1/32
A61B19/00-19/08

专利名称(译)	3D仪器路线规划，模拟和控制系统		
公开(公告)号	JP5442993B2	公开(公告)日	2014-03-19
申请号	JP2008535158	申请日	2006-10-06
[标]申请(专利权)人(译)	皇家飞利浦电子股份有限公司		
申请(专利权)人(译)	皇家飞利浦电子股份有限公司的Vie		
当前申请(专利权)人(译)	皇家飞利浦NV哥德堡		
[标]发明人	トロヴァトカレンアイ コーエンソラルエリック ステイダグラスサマーズ		
发明人	トロヴァト,カレン アイ コーエン-ソラル,エリック ステイ,ダグラス サマーズ		
IPC分类号	A61B1/00 A61B1/267 A61B1/273 A61B19/00		
CPC分类号	A61B90/36 A61B34/10 A61B90/10 A61B2017/00331 A61B2034/107		
FI分类号	A61B1/00.320.Z A61B1/26 A61B19/00.502		
代理人(译)	伊藤忠彦		
优先权	60/725185 2005-10-11 US		
其他公开文献	JP2009511155A		
外部链接	Espacenet		

摘要(译)

设置在导管（包括消融导管），用于与支气管镜/内窥镜和斜面，装置和方法的针的控制的系统。支气管镜（100）的控制，计算用于基于所述函数和所述支气管镜的患者的形态的3D环境。这可用于计划和模拟最佳运动，训练或比较手术技术，或自动化程序。某些支气管镜，而不是依赖于统计标准，是根据它的形状和弹性，还可以根据患者的个人形态推荐。对于所有的仪器，六维配置空间的问题是通过使用“6D近”三个存储尺寸和路径规划解决。本发明从“开始”到目标找到运动学上可行的路径，同时避开障碍物和危险区域。

スレッド番号	左右制御	上下制御
410	中央	上
420	右	上
430	右	水平
440	右	下
450	中央	下
460	左	下
470	左	水平
480	左	上
490	中央	水平