



(10) **DE 10 2010 009 017 A1** 2011.03.10

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2010 009 017.4**  
(22) Anmeldetag: **24.02.2010**  
(43) Offenlegungstag: **10.03.2011**

(51) Int Cl.<sup>8</sup>: **A61B 19/00** (2006.01)

**A61B 6/03** (2006.01)  
**A61B 17/00** (2006.01)  
**B81C 3/00** (2006.01)  
**B25J 7/00** (2006.01)  
**A61F 2/82** (2006.01)  
**A61F 2/84** (2006.01)  
**A61M 25/01** (2006.01)  
**A61B 5/00** (2006.01)  
**H01L 31/0352** (2006.01)

(66) Innere Priorität:

**10 2009 039 520.2**    **31.08.2009**  
**10 2009 060 092.2**    **22.12.2009**

(71) Anmelder:

**Siemens Aktiengesellschaft, 80333 München, DE**

(72) Erfinder:

**Pfister, Marcus, Dr., 91088 Bubenreuth, DE**

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
gezogene Druckschriften:

**DE 10 2004 044435 A1**  
**US 2009/02 53 587 A1**  
**WO 2008/0 63 473 A2**

**CAVALCANTI, A., et al.:** "Hardware Architecture for Nanorobot Application in Cerebral Aneurysm". In: Proc. of the 7th IEEE Int. Conf. on Nanotechnology, 2.-5. Aug. 2007, S.237-242

**JIANG H., et al.:** "Construction of Medical NanoRobot". In: 2005 IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics, S.151-154

**FELFOUL O., et al.:** "In Vivo MR-Tracking Based on Magnetic Signature Selective Excitation". In: IEEE Trans. on Medical Imaging, Vol.27, Nr.1, Jan.2008, S.28-35

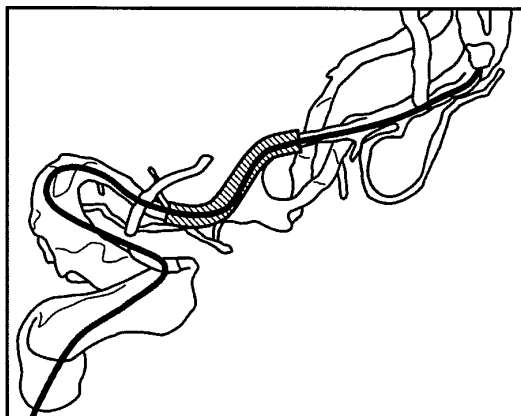
**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen**

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur Bildung eines endovaskulären Behandlungshilfsmittels mit Hilfe von selbstorganisierenden, aus Catomen (Cat) bestehenden Nanoroboter und dazu gehöriges System**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bildung mindestens eines Teils eines vorzugsweise endovaskulären interventionellen Hilfsmittels mit Hilfe von selbstorganisierenden, aus Catomen (Cat) bestehenden Nanoroboter und ein dazu gehöriges System. Das Verfahren weist folgende Schritte auf:

- Verwendung mindestens eines 3D-Bilddatensatzes eines Ziel-Bereichs,
- Bestimmung einer Form des benötigten interventionellen Hilfsmittels aus dem mindestens einen 3D-Bilddatensatz,
- Umwandlung der bestimmten Form in einen für die jeweiligen Catome (Cat) der Nanoroboter lesbaren und ausführbaren Programmcode und Übertragung desselben an diese sowie dessen dortige Speicherung,
- Aktivierung der Ausführung des Programmcodes, das ein sich Organisieren der zuvor unstrukturierten Catome zu dem benötigten interventionellen Hilfsmittel gemäß der zuvor bestimmten Form hervorruft.



## Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bildung mindestens eines Teils eines vorzugsweise endovaskulären interventionellen Hilfsmittels mit Hilfe von selbstorganisierenden, aus Catomen (Cat) bestehenden Nanoroboter und eine dazu gehörige Systemeinheit.

### Hintergrund der Erfindung

**[0002]** Zahlreiche Untersuchungen und Eingriffe an Patienten werden mittlerweile minimalinvasiv durchgeführt. Bei diesen Prozeduren werden durch kleine Öffnungen (z. B. einem Zugang in der Leiste) Instrumente (Katheter etc.) in den Patienten eingeführt, um im Herz, Kopf oder Abdomen Untersuchungen oder Therapien durchzuführen. Diese Prozeduren werden mit Hilfe zweidimensionaler Röntgendurchleuchtungsbilder, z. B. mittels C-Arm-Angiographiesystemen, kontrolliert. Moderne Angiographie-Systemen sind zusätzlich in der Lage, durch Rotation des C-Armes um den Patienten und Rekonstruktion der Rotationssequenzen, dreidimensionale Bilder des Untersuchungsgebietes aufzunehmen.

**[0003]** Bei vielen dieser Interventionen werden „therapeutische Hilfsmittel“ in den Patienten eingebracht, z. B.

- Stents, z. B. um die Erweiterungen verengter Gefäße zu stützen oder Gefäßabschnitte zu reparieren,
- flexible Spulen (Coils), z. B. um Gefäßausstülpungen, so genannt Aneurysmen, zu verschließen,
- Mikrokugeln, z. B. um tumorversorgende Gefäße zu verschließen/embolisieren.

**[0004]** Dies birgt prinzipiell drei Schwierigkeiten:

1. Um einen optimalen therapeutischen Erfolg zu erzielen, müssen diese Hilfsmittel im allgemeinen sehr genau auf die jeweilige Anatomie des Patienten zugeschnitten sein. Die entsprechende Auswahl erfordert Zeit und ein sehr genaues Ausmessen der Anatomie, z. B. anhand eines 3D-Datensatzes. Dieses Ausmessen erfolgt entweder manuell oder mit Unterstützung der 3D-Bildverarbeitung (z. B. einer Segmentierung des Gefäßabschnittes). Oft ist ein 100% passendes Hilfsmittel (z. B. ein genau passender Stent) auch nicht vorhanden, sondern muss entweder extra angefertigt werden, oder es muss der „zweitbeste“ gewählt werden.
2. Das gewählte Hilfsmittel, also z. B. Coil oder Stent, muss optimal platziert werden. So dürfen z. B. Stents keine abgehenden Gefäße verschließen oder Coils nicht in das Trägergefäß ragen (um Embolien zu vermeiden). Letzteres ist besonders problematisch, da Coils beim Einbringen in

ein Aneurysma andere Formen annehmen können als geplant.

3. Die Navigation des Führungsdrahtes oder Katheters an die zu behandelnde Stelle. Bei der Behandlung z. B. von zerebralen Aneurysmen sollten sehr kleine oder enge Gefäßabzweigungen behandelt werden. Bei Behandlungen im Herzen hingegen müssen, im durch den Herzschlag bewegten Organ, bestimmte Punkte präzise angefahren werden.

**[0005]** Hintergrund der vorliegenden Erfindung sind das Formen und Einbringen solcher Hilfsmittel, bzw. von Navigationshilfsmitteln, durch sogenanntes „Dynamic Physical Rendering“ (DPR) oder „Claytronics“ [1, 2, 3, 4, 5], wobei hier die interdisziplinäre Forschergruppe Claytronics der Carnegie Mellon University namensgebend ist. Der Forschungsgegenstand (ein aktuelles Teilforschungsgebiet der Nanotechnologie in Konvergenz mit der Robotik) wird auch bezeichnet als „Programmierbare (oder Intelligente) Materie“. Das Ziel des Forschungsgebietes ist es, „intelligente“ autonome „Materialteilchen“, also autonome Nanoroboter, durch sogenanntes „Dynamic Physical Rendering“ (DPR) zu real existenten Makrokörpern beliebiger, programmierbarer Form anzuordnen. Die in „Claytronics“ verwendeten speziellen Nano-Roboter werden „Catome“, genannt, in Zusammenziehung der Bezeichnungen „Claytronics“ und Atom. Dies sind im Prinzip kleine, autonome Roboter, die in Selbstorganisation in der Lage sind, eine vorher gemeinsam einprogrammierte größere Gestalt einzunehmen.

**[0006]** Aus [5] sind intelligente Nanoroboter als Kollektiv (Collective) bekannt. Sie können selbstständig agieren, Medikamente in Zellen bringen usw. Es werden Wege beschrieben, wie die CNRs (Collective of Nanorobots) nun vor Ort gebracht werden können. Sie werden z. B. an Antikörper gebunden, die die CNRs grob z. B. in Entzündungsgebiete ziehen. Sie werden auch auf (auf konventionellem Wege eingebrachten) Stents platziert, der dann quasi als eine Art „Basis“ dient. Von dort führen sie ihren Aufgaben aus (z. B. Schlaganfall- oder Entzündungsbekämpfung) und kehren zu diesem zurück.

**[0007]** Veröffentlichungen z. B. [1, 3, 4] zeigen, dass die Lokalisierung und Selbstorganisation der Roboter für kleine Einheiten bzw. in der Simulation bereits anwendbar ist. Herausforderungen für die endovaskulären Anwendung sind noch die Größe und Energieversorgung der zu verwendenden Einheiten. Die Miniaturisierung dieser Einheiten schreitet jedoch stetig voran.

**[0008]** Die Erfindung geht von der Aufgabe aus, „intelligente“ autonome „Materialteilchen“, also die eingangs erwähnten, autonomen Nanoroboter durch so-

genanntes „Dynamic Physical Rendering“ (DPR) für minimalinvasive Prozeduren einsetzbar zu machen.

#### Darstellung der Erfindung

**[0009]** Die Aufgabe wird mit dem Verfahren sowie der Vorrichtung gemäß den unabhängigen Patentansprüchen gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen des Verfahrens sowie der Vorrichtung sind Gegenstand der abhängigen Patentansprüche oder lassen sich aus der nachfolgenden Beschreibung sowie den Ausführungsbeispielen entnehmen.

**[0010]** Ein Aspekt der Erfindung ist ein Verfahren zur Bildung mindestens eines Teils eines interventionellen Hilfsmittels mit Hilfe von selbstorganisierenden, aus Catomen (Cat) bestehenden Nanoroboter, aufweisen folgende Schritte:

- Verwendung mindestens eines 3D-Bilddatensatzes eines Ziel-Bereichs, vorzugsweise des zu behandelnden Bereichs,
- Bestimmung einer Form des oder der benötigten Teil(e) des interventionellen Hilfsmittels aus dem mindestens einen 3D-Bilddatensatz,
- Umwandlung der bestimmten Form in einen für die jeweiligen Catome (Cat) der Nanoroboter lesbaren und ausführbaren Programmcode und Übertragung desselben an diese sowie dessen dortige Speicherung,
- Aktivierung der Ausführung des Programmcodes, das ein sich Organisieren der zuvor unstrukturierten Catome zu dem benötigten Interventionellen Hilfsmittel gemäß der zuvor bestimmten Form hervorruft.

**[0011]** Ein weiterer Aspekt der Erfindung ist eine Systemeinheit bzw. Vorrichtung zur Organisation von aus Catomen bestehenden Nanorobotern, geeignet zur Durchführung des Verfahrens, umfassend:

- Mehrere Nanoroboter, wobei jeder Nanoroboter, der zumindest einen Teil eines Programmcodes umfasst, wodurch die Nanoroboter zur Bildung zumindest eines Teils eines interventionellen Hilfsmittels mit Hilfe der Nanoroboter durch Kommunikation und Austausch von Information mit anderen Nanorobotern konfiguriert sind,
- wobei die Nanoroboter in eine Ziel-Bereich, vorzugsweise des zu behandelnden Bereichs, einbringbar oder eingebracht sind,
- wobei die Nanoroboter Mittel zur Ausführung des Programmcodes aufweisen, das in der Weise aktivierbar ist, dass ein sich Organisieren der zuvor unstrukturierten Catome zu dem mindestens einen Teil des benötigten interventionellen Hilfsmittel gemäß der zuvor bestimmten Form hervorruft ist.

**[0012]** Vorzugsweise kann der mindestens eine Teil des benötigten interventionellen Hilfsmittels in einem endovaskulären Ziel-Bereich bzw. zur Navigati-

on in einen solchen Zielbereich eingesetzt werden. Der mindestens eine Teil des benötigten Interventionelles Hilfsmittels kann durch ein vollständiges und/oder stationär im Körper verbleibendes interventionelles Hilfsmittel, vorzugsweise zumindest einen Stent, Coil, oder durch ein temporäres, insbesondere nur zu Navigationszwecken vorübergehend gebildetes, Hilfsmittel, wie Katheter und/oder Führungsdraht, bzw. durch vorzugsweise zumindest einen Teil zumindest eines Katheters und/oder Katheterspitze und/oder zumindest eines Führungsdrahts und/oder zumindest einer Führungshilfe repräsentiert werden.

**[0013]** Eine vorteilhafte Weiterbildung der Erfindung sieht vor, dass die Nanoroboter mit Hilfe eines Katheters in den Ziel-Bereich eingebracht werden können.

**[0014]** Als Auslöser der Aktivierung des Programmcodes kann ein Zeitgeber oder Positionssensor verwendet werden.

**[0015]** Vorteilhafterweise kann der zu behandelnde Bereich aus dem 3D-Bilddatensatz segmentiert werden, wobei die Segmentierung anhand gesetzter Markierungspunkte durchgeführt werden.

**[0016]** Die bestimmte Form des benötigten interventionellen Hilfsmittels kann auf einem dreidimensionalen Modell basieren, das Variationen einer bestimmten Grundform (z. B. eines Zylinders) darstellt.

#### Vorteilhafte Auswirkungen der Erfindung

**[0017]** So können die Hilfsmittel schnell, automatisch, optimal und patientenindividuell ohne vorheriges manuelles Aus- bzw. Vermessen geformt, eingebracht und platziert werden.

#### Beschreibung eines oder mehrerer Ausführungsbeispiele

**[0018]** Weitere Vorteile, Einzelheiten und Weiterbildungen der Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung von Ausführungsbeispielen in Verbindung mit den Zeichnungen. In der Zeichnung zeigen:

**[0019]** [Fig. 1a](#) und [Fig. 1b](#) zeigen „Catome“, also die „Claytronics“ Hardware, deren Durchmesser beispielsweise unter 1 mm möglich ist,

**[0020]** [Fig. 2a](#), [Fig. 2b](#) und [Fig. 2c](#) ein Beispiel für die Bildung eines stationären Hilfsmittels, nämlich eines Stents in einem abdominalen Aneurysma,

**[0021]** [Fig. 3a](#), [Fig. 3b](#) und [Fig. 3c](#) ein Beispiel für die Bildung eines stationären Hilfsmittels, nämlich eines Coils in einem zerebralen Aneurysma,

[0022] [Fig. 4a](#), [Fig. 4b](#) und [Fig. 4c](#) ein Beispiel eines stationären Hilfsmittels zum Embolisieren eines Lebertumors,

[0023] [Fig. 5a](#), [Fig. 5b](#), [Fig. 5c](#), [Fig. 5d](#), [Fig. 6a](#), [Fig. 6b](#), [Fig. 6c](#), [Fig. 6d](#) und [Fig. 7a](#), [Fig. 7b](#), [Fig. 7c](#), [Fig. 7d](#) ein Beispiel für ein temporäres Hilfsmittel zur Navigation bei schwierigen „Abzweigungen“ in Hirngefäßen und

[0024] [Fig. 8a](#), [Fig. 8b](#), [Fig. 8c](#), [Fig. 8d](#), [Fig. 9a](#), [Fig. 9b](#), [Fig. 9c](#), [Fig. 9d](#) und [Fig. 10a](#), [Fig. 10b](#), [Fig. 10c](#), [Fig. 10d](#) ein Beispiel für ein temporäres Hilfsmittel zur Navigation zur Ablation bei Herzrhythmusstörungen.

[0025] Die erfindungsgemäße Anwendung für endovaskuläre Interventionen sieht nun den temporären oder festen „Nachbau“ vorher bestimmter anatomischer Strukturen vor, um die Auswahl und das Platzieren z. B. von Stents und Coils zu erleichtern.

[0026] Die Bildung eines stationären interventionellen Hilfsmittels aus Catomen wird im Folgenden an drei Beispielen erläutert:

Ausgangspunkt ist jeweils ein 3D Datensatz (z. B. eine CT-Angiographie, eine Rotations-Angiographie oder ein C-Arm CT) des zu behandelnden Bereiches. Unter Umständen kann eine Segmentierung (z. B. Gefäß-Segmentierung) des Datensatzes vorteilhaft sein.

[0027] [Fig. 2a](#), [Fig. 2b](#) und [Fig. 2c](#) zeigen ein Beispiel für die Bildung eines Stents in einem abdominalen Aneurysma.

[0028] Ausgangspunkt ist ein 3D-Datensatz (z. B. eine CT-Angiographie des Aneurysmas. Aufgrund einer Segmentierung des Datensatzes (z. B. in Lumen und Thrombus) und eventueller durch den Benutzer gesetzter Markierungs- bzw. Messpunkte (die z. B. die geplanten Stentgrenzen markieren), die in [Fig. 2a](#) durch „Kreuze“ markiert angedeutet sind, kann die Form des „optimalen“ Stents automatisch errechnet werden, z. B. als Gittermodell, wie es beispielsweise in [Fig. 2b](#) dargestellt ist. Dieses Modell gilt dann als Programmierung für die Catome Cat, die z. B. über einen Katheter in unstrukturierter Form in das Aneurysma eingebracht werden können (siehe [Fig. 2c](#)). Vor Ort organisieren sich die Einheiten, wie vorher festgelegt (siehe [Fig. 2b](#)), zu dem Stent der vorher bestimmten Form (siehe [Fig. 2c](#)).

[0029] Vorteile sind, neben der optimalen Anpassung des Stents an das Gefäß, die optimale Platzierung (ohne die Gefahr, abgehende Gefäße, wie z. B. Nierenarterien, zu verschließen) und das im Vergleich zur üblichen Platzierung eines abdominalen Stents unkomplizierte Einbringen.

[0030] [Fig. 3a](#), [Fig. 3b](#) und [Fig. 3c](#) zeigen ein Beispiel für die Bildung eines Coils in einem zerebralen Aneurysma.

[0031] Ausgangspunkt ist ein 3D-Datensatz (z. B. eine CT- oder Rotations-Angiographie des Aneurysmas. Aufgrund einer Segmentierung des Datensatzes und eventueller durch den Benutzer gesetzter Messpunkte die hier z. B. die Grenzen des zu verschließenden Gebietes bezeichnen), die in [Fig. 3a](#) durch „Kreuze“ markiert angedeutet sind, kann die Form des „optimalen“ Coils automatisch errechnet werden, z. B. als Gittermodell, wie es beispielsweise in [Fig. 3b](#) dargestellt ist. Neben dem Coil zum Verschließen des Aneurysmas können auch eventuelle Gefäßplastiken zum Modellieren der betroffenen Gefäße berücksichtigt werden. Auf diese Weise kann ein sehr komplexes „Reparaturhilfsmittel“ geplant werden. Dieses Modell gilt dann als Programmierung für die Catome Cat, die z. B. über einen Katheter in das Aneurysma eingebracht werden können (siehe [Fig. 3c](#)). Vor Ort organisieren sich die Einheiten, wie vorher festgelegt (siehe [Fig. 3b](#)), zu dem Coil bzw. den Stents der vorher bestimmten Form (siehe [Fig. 3c](#)). Vorteile sind, neben dem optimalen Design des Coils, die optimale Platzierung (ohne die Gefahr das Trägergefäß zu verschließen oder anders zu beeinträchtigen) und das im Vergleich zum üblichen Coils und Stents eines intrakraniellen Aneurysmas, unkomplizierte Einbringen.

[0032] [Fig. 4a](#), [Fig. 4b](#) und [Fig. 4c](#) zeigen ein Beispiel am Embolisieren eines Lebertumors.

[0033] Ausgangspunkt ist ein 3D-Datensatz (z. B. eine CT- oder Rotations-Angiographie des den Tumor versorgenden Lebergefäßes. Aufgrund einer Segmentierung des Datensatzes und eventueller durch den Benutzer gesetzter Messpunkte (die hier z. B. die zu verschließenden Gefäße markieren), die in [Fig. 4a](#) durch „Kreuze“ markiert angedeutet sind, kann die Form der „optimalen“ Blockaden für die zu embolisierenden Arterien berechnet werden, z. B. als Gittermodell, wie es beispielsweise in [Fig. 4b](#) gezeigt ist. Dieses Modell gilt dann als Programmierung für die Catome Cat, die z. B. über einen Katheter in die Leberarterien eingebracht werden können (siehe [Fig. 4c](#)). Vor Ort organisieren sich die Einheiten, wie vorher festgelegt (siehe [Fig. 4b](#)), zu den Embolisierungen der vorher bestimmten Form (siehe [Fig. 4c](#)).

[0034] Die Beschriebenen Messpunkte können für die jeweilige Anwendung auch automatisch von der Segmentierung vorgeschlagen werden. So können beispielsweise die Stentgrenzen für einen abdominalen Stent (siehe [Fig. 2a](#)) durch die Lage der Nierenarterienabgänge und die Abzweigungen der Beinarterien automatisch vorgeschlagen werden. Für ein intrakranielles Aneurysma könnten als Messpunkte z.

B. die Abzweigungen der zuführenden Gefäße vorgeschlagen werden usw.

**[0035]** Des weiteren kann in einer weiteren Ausführung die Form des interventionellen Hilfsmittels, z. B. eines Stents, nicht anhand des 3D-Modelles bestimmt werden, sondern aus einer Auswahl verfügbarer bzw. vorgegebener, ggf. geometrischer Standardformen, z. B. Stents verschiedener Längen und Durchmesser gewählt werden. Dann nehmen die Catome die entsprechende Form ein. Vorteil ist weiterhin das einfache Einbringen des Hilfsmittels.

**[0036]** Die Bildung von nichtstationären bzw. temporären interventionellen Hilfsmitteln, insbesondere zur Navigation, aus Catomen wird im Folgenden an zwei weiteren Beispielen erläutert:

**[0037]** [Fig. 5a](#), [Fig. 5b](#), [Fig. 5c](#), [Fig. 5d](#), [Fig. 6a](#), [Fig. 6b](#), [Fig. 6c](#), [Fig. 6d](#) und [Fig. 7a](#), [Fig. 7b](#), [Fig. 7c](#), [Fig. 7d](#) zeigen ein Beispiel für eine Navigation bei schwierigen „Abzweigungen“ in Hirngefäßen. Problem bei der Behandlung z. B. von zerebralen Aneurysmen ist das Navigieren des Führungsdrahtes oder Katheters an die zu behandelnde Stelle. Besonders im zerebralen Gefäßsystem finden sich enge Windungen oder komplexe Abzweigungen, die schwer zu passieren sind. Es sind für dieses Beispiel die folgenden drei Möglichkeiten denkbar:

1. Bilden von Führungen gemäß [Fig. 5a](#), [Fig. 5b](#), [Fig. 5c](#), [Fig. 5d](#): Ausgangspunkt ist ein 3D-Datensatz (z. B. eine CT- oder Rotations-Angiographie) der Hirngefäße. Aufgrund einer Segmentierung des Datensatzes und eventueller durch den Benutzer gesetzter Messpunkte kann der Arzt für potentiell schwierig zu navigierende „Abzweigungen“ den zu verfolgenden Weg bestimmen (siehe [Fig. 5a](#)). Aufgrund des 3D-Datensatzes ist dadurch die Form der später durch die Catome einzunehmenden „Katheterführung“ festgelegt. Erreicht der Arzt die Abzweigung mit einem Katheter, werden die Catome Cat zunächst unstrukturiert eingebracht (siehe [Fig. 5b](#)). Vor Ort formen sie sich dann zu der gewünschten „Führung“ (siehe [Fig. 5c](#)), so dass der Katheter problemlos und schnell durch die Abzweigung in die richtige Richtung geschoben werden kann. Nach erfolgreichem passieren der Abzweigung kann sich die Form wieder auflösen (siehe [Fig. 5d](#)). Die Catome können dann z. B. „abgesaugt“ werden oder unstrukturiert im Körper verbleiben.

2. Bilden eines kompletten Instrumentes (siehe [Fig. 6a](#), [Fig. 6b](#), [Fig. 6c](#), [Fig. 6d](#)): Ausgangspunkt ist ein 3D Datensatz (z. B. eine CT- oder Rotations-Angiographie) der Hirngefäße. Der Benutzer markiert nun einfach den Endpunkt E der Navigation, z. B. das Aneurysma, sowie eventuell einen in einem leicht zu erreichenden Teil der zuführenden Arterie (siehe [Fig. 6a](#)). Aufgrund einer Segmentierung des Datensatzes errechnet das System die

beste Verbindungslinie zum Navigationsziel. Dies ist die Form des später durch die Catome Cat zu formenden Katheters. Erreicht der Arzt nun einen Punkt nahe des gewählten Startpunktes S, bringt er (in unstrukturierter Form) nach und nach Catome ein (siehe [Fig. 6b](#)). Vor Ort formen sich diese dann zu einem dünnen Röhrchen, das der vorher bestimmten Form folgt, und so nach und nach den Katheter bildet (siehe [Fig. 6c](#)) bis das Zielgebiet erreicht ist (siehe [Fig. 6d](#)). Nach Beenden der Intervention kann sich die Form wieder auflösen. Die Catome können dann z. B. „abgesaugt“ werden oder unstrukturiert im Körper verbleiben.

3. Bilden von Teilstücken eines Instrumentes (siehe [Fig. 7a](#), [Fig. 7b](#), [Fig. 7c](#), [Fig. 7d](#)): Ausgangspunkt ist ein 3D Datensatz (z. B. eine CT- oder Rotations-Angiographie) der Hirngefäße. Der Benutzer markiert nun einfach den Endpunkt der Navigation, z. B. das Aneurysma, sowie eventuell einen in einem leicht zu erreichenden Teil der zuführenden Arterie ([Fig. 7a](#)). Aufgrund einer Segmentierung des Datensatzes errechnet das System die beste Verbindungslinie zum Navigationsziel. Der Arzt bringt nun einen Katheter K Cat ein, dessen Katheterspitze aus Catomen geformt ist und lokalisierbar ist (z. B. durch einen Positionssensor). Erreicht der Arzt nun einen Punkt jenseits des gewählten Startpunktes S, formen sich die bislang unstrukturierten Catome automatisch zu „Biegungen“, die vor allem an den Krümmungen und Abzweigungen der errechneten Verbindungslinie entsprechen ([Fig. 7b](#), [Fig. 7c](#), [Fig. 7d](#)). So formt sich das Instrument optimal für jede Abzweigung, um so die Navigation zu erleichtern. Die Catome müssen dann nicht „abgesaugt“ werden oder unstrukturiert im Körper verbleiben, da sie fester Teil des verwendeten Instrumentes sind.

**[0038]** [Fig. 8a](#), [Fig. 8b](#), [Fig. 8c](#), [Fig. 8d](#), [Fig. 9a](#), [Fig. 9b](#), [Fig. 9c](#), [Fig. 9d](#) und [Fig. 10a](#), [Fig. 10b](#), [Fig. 10c](#), [Fig. 10d](#) zeigen ein Beispiel für eine Navigation zur Ablation bei Herzrhythmusstörungen. Bei dieser Prozedur werden in den Herz-Vorhöfen des Patienten bestimmte Nervenbahnen verödet, (meistens elektrothermisch) um so unerwünschte Reizleitungen zu unterbinden. Hierbei wird ein so genannter „Lassokatheter“, als eine Elektrode, in eine der Pulmonalvenen eingebracht, um dann mit einem elektrischen Ablationskatheter die Verödungen zu setzen. Problem hierbei ist das genaue Anfahren der richtigen Punkte, so daß einerseits die Behandlung erfolgreich ist und andererseits keine größeren Schäden angerichtet werden. Erschwert wird die Prozedur durch die Herzbewegung, die ein präzises Anfahren der Punkte erschwert. Es sind für dieses Beispiel die folgenden drei Möglichkeiten denkbar:

1. Bilden von Führungen (siehe [Fig. 8a](#), [Fig. 8b](#), [Fig. 8c](#), [Fig. 8d](#)): Es werden in den Herzkammern bestimmte Nervenbahnen verödet (meistens elektrothermisch), um so unerwünschte Reizleitungen



zu unterbinden (siehe [Fig. 8a](#)). Ausgangspunkt ist ein 3D Datensatz (z. B. ein CT oder MR) der entsprechenden Herzkammer. In einer Segmentierung des Datensatzes kann der Arzt die später anzufahrenden Ablationspunkte AP markieren (siehe [Fig. 8b](#)). Aufgrund des 3D-Datensatzes und der darin geplanten Punkte ist die Form der später durch die Catome einzunehmenden „Katheterführung“ festgelegt. Diese sollen in diesem Fall eine „Maske“ bilden, die die Herzkammerwand abdeckt und nur die zu verödenden Punkte freilässt (eventuell mit einer entsprechenden Führung (siehe [Fig. 8b](#)). Der Arzt kann nun die Catome unstrukturiert einbringen ([Fig. 8c](#)), vor Ort formen sie sich dann zu der gewünschten „Maske“ ([Fig. 8d](#)), so dass der Ablationskatheter problemlos und schnell an die entsprechenden Punkte gebracht werden kann, der Rest der Herzwand jedoch geschützt ist. Nach erfolgreichem Anfahren der Punkte kann sich die Form wieder auflösen. Nach Beenden der Intervention kann sich die Form wieder auflösen. Die Catome können dann z. B. „abgesaugt“ werden oder unstrukturiert im Körper verbleiben.

2. Bilden eines kompletten Instrumentes ([Fig. 9a](#), [Fig. 9b](#), [Fig. 9c](#), [Fig. 9d](#)): Ausgangspunkt ist ein 3D Datensatz (z. B. ein CT oder MR) der entsprechenden Herzkammer. In einer Segmentierung des Datensatzes kann der Arzt die später anzufahrenden Ablationspunkte AP markieren (siehe [Fig. 9a](#)). Aufgrund des 3D-Datensatzes und der darin geplanten Punkte ist die Form des später durch die Catome zu bildenden Ablationsinstrumentes festgelegt. Diese können in diesem Fall eine „Maske“ bilden, die die Herzkammerwand abdeckt und z. B. an den zu verödenden Punkten untereinander durch Verbindungen V verbundene, leitfähige Elektroden EI ausbildet (siehe [Fig. 9b](#)). Eventuell kann auch ein Lassokatheter mitgeformt werden. Auch können einfache Anschlüsse gebildet werden, auf die die stromführenden Katheter aufsetzen. Der Arzt kann nun die Catome unstrukturiert einbringen (siehe [Fig. 9c](#)), vor Ort formen sie sich dann zum gewünschten Instrument ([Fig. 9d](#)). Die Anschlüsse AK müssen nun nur noch von außen mit den elektrischen Kathetern „besetzt“ werden, so dass die Ablation trotz Herzbewegung sicher und in einem Schritt stattfinden kann. Nach erfolgreicher Ablation kann sich die Form wieder auflösen. Die Catome können dann z. B. „abgesaugt“ werden oder unstrukturiert im Körper verbleiben.

3. Bilden von Teilstücken eines Instruments zur Navigation ([Fig. 10a](#), [Fig. 10b](#), [Fig. 10c](#), [Fig. 10d](#)): Ausgangspunkt ist ein 3D Datensatz (z. B. ein CT oder MR) der entsprechenden Herzkammer. In einer Segmentierung des Datensatzes kann der Arzt die später anzufahrenden Ablationspunkte AP markieren ([Fig. 10a](#)). Somit ist deren 3D-Position im Raum bekannt. Diese können eine

„Maske“ bilden, die die Herzkammerwand abdeckt und z. B. an den zu verödenden Punkten untereinander durch Verbindungen V verbundene, leitfähige Elektroden EI ausbildet (siehe [Fig. 10b](#)). Eventuell kann auch ein Lassokatheter mitgeformt werden. Auch können einfache Anschlüsse gebildet werden, auf die die Katheter aufsetzen. Der Arzt bringt nun einen Ablationskatheter ein, dessen Katheterspitze aus Catomen geformt ist und lokalisierbar ist (z. B. durch einen Positionssensor) ([Fig. 10c](#)). Erreicht der Arzt nun einen Punkt nahe des Ablationsgebietes, formen sich die bislang unstrukturierten Catome automatisch zu „Biegungen“, die zu den vordefinierten Ablationspunkten P<sub>AP</sub> führen ([Fig. 10d](#)). So formt sich das Instrument optimal für das Anfahren von jedem Ablationspunkt. Hierbei können entweder automatisch alle Punkte abgefahren werden oder das Anfahren vom Arzt angestoßen werden. Die Katome müssen dann nicht „abgesaugt“ werden oder unstrukturiert im Körper verbleiben, da sie fester Teil des verwendeten Instrumentes sind.

**[0039]** Des Weiteren kann in einer weiteren Ausführungsform bei der Bildung von Führungen die Formen statt auf einem exakten Patienten-3D-Modell auch auf Variationen einfacher geometrischer Grundformen beruhen. Z. B. können neben einer komplexen anatomisch genauen Führung auch einfache „Röhrchen“ zum passieren einer Abzweigung gebildet werden.

**[0040]** Statt eines 3D-Datensatzes können, insbesondere für Anwendungen im Herzen, auch 4D-Datensätze (3D- sowie zeitliche Information, z. B. Herzbewegung) verwendet werden. Die Position des Instrumentes kann dann entsprechend genauer, z. B. auch über Korrelation mit einem EKG-Signal bestimmt werden.

**[0041]** Zusammenfassend haben die vorstehend genannten Beispiele folgendes gemeinsames Vorgehen:

- Ausgehend von einem gegebenenfalls segmentierten 3D-Datensatz des zu behandelnden Ziel-Bereiches (z. B. ein Gefäßsystem) wird ein 3D-Modell des benötigten Hilfsmittels (Stent, Coil, Navigations- bzw. Führungshilfe, vollständiger Katheter oder Teil eines Katheters z. B. Katheterspitze, etc.) bestimmt.
- Je nach gewähltem Modell (Stent, Coil, Führungshilfe, Katheter(spitze) etc.) wird ein entsprechendes „Programm“ für die beteiligten Catome verwendet und an diese Übertragen.
- Die Catome werden unstrukturiert, z. B. über einen Katheter, in den zu behandelnden Ziel-Bereich eingebracht bzw. sie sind in unstrukturierter Form Teil eines Katheters oder anderen Instrumentes (siehe oben).

- Vor Ort organisieren sich die Einheiten bzw. Catome, z. B. nach einem geeigneten „Startbefehl“, der vorher festgelegt sein kann, zu einer vorher bestimmten Form (z. B. entsprechend des 3D-Modells) wie beispielsweise:
  - einem oder mehreren Coils bzw. Stents,
  - als Navigations- bzw. Führungshilfe,
  - zu einem kompletten Katheter bzw.
  - zu einem Teil eines Katheters z. B. Katheterspitz durch Verformung.
- Nach Beendigung der Prozedur lösen sich die temporären Hilfsmittel wieder auf. Die Catome verbleiben entweder im Körper oder werden (z. B. durch Absaugen) wieder entfernt.
- Die stationären Hilfsmittel (z. B. Stents oder Coils) verbleiben in fester Form in Körper, z. B. um das behandelte Aneurysma dauerhaft zu verschliessen.

**[0042]** Hierbei sind prinzipiell zwei Ausführungsformen denkbar:

- Die Catome sind selbst „intelligente Einheiten“, die z. B. ihre gegenseitige Lokalisierung und Bestimmung der nächsten Schritte selbst vornehmen, oder
- sie haben die Intelligenz teilweise „ausgelagert“, z. B. an einen extra- oder (temporär) intrakorporalen „Zentralrechner“. Die Catome können diesem z. B. dann nur ihre jeweilige Position senden, der Zentralrechner verwaltet die Selbstorganisation und berechnet die nächsten Schritte für jedes Catom und sendet die entsprechenden Befehle dann an die Catome zurück, die diese Befehle entsprechend ausführen. Die Catome sollten dann nur in der Lage sein, falls erforderlich, bestimmte Navigationen bzw. Verformungen durchzuführen.

#### Referenzen

- [1] „Magie des schlaun Sandes“, Der Spiegel, Nr. 6/2009 vom 02.02.2009.
- [2] „Dynamic Physical Rendering“, Wikipedia, Stand 10.03.2009
- [3] „Claytronics“, CMU Homepage der Forschergruppe, Stand 10.03.2009
- [4] „Distributed Localization of Modular Robot Ensembles“, Stanislav Funiak, Padmanabhan Pillai, Michael P. Ashley-Rollman, Jason D. Campbell, and Seth Copen Funiak, In Proceedings of Robotics: Science and Systems, Juni 2008 (Und Referenzen darin).
- [5] WO 2008/063473 A2

#### Patentansprüche

1. Verfahren zur Bildung mindestens eines Teils eines interventionellen Hilfsmittels mit Hilfe von selbstorganisierenden, aus Catomen (Cat) bestehenden Nanoroboter, aufweisend folgende Schritte:
  - a) Verwendung mindestens eines 3D-Bilddatensatzes eines Ziel-Bereichs,
  - b) Bestimmung einer Form des mindestens eines Teils des benötigten interventionellen Hilfsmittels aus dem mindestens einen 3D-Bilddatensatz,
  - c) Umwandlung der bestimmten Form in einen für die jeweiligen Catome (Cat) der Nanoroboter lesbaren und ausführbaren Programmcode und Übertragung desselben an diese sowie dessen dortige Speicherung,
  - d) Aktivierung der Ausführung des Programmcodes, der ein sich Organisieren der zuvor unstrukturierten Catome zu dem mindestens einen Teil des benötigten interventionellen Hilfsmittels gemäß der zuvor bestimmten Form hervorruft.
2. Verfahren nach dem vorhergehenden Anspruch, dadurch gekennzeichnet, dass als Auslöser der Aktivierung des Programmcodes ein Zeitgeber oder ein Positionssensor verwendet wird.
3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der mindestens eine Teil des benötigten interventionellen Hilfsmittels in einem endovaskulären Ziel-Bereich eingesetzt wird.
4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der mindestens eine Teil des benötigten interventionellen Hilfsmittels durch ein vollständiges interventionelles Hilfsmittel, vorzugsweise zumindest einen Stent, Coil, Katheter und/oder Führungsdraht, repräsentiert wird.
5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der mindestens eine Teil des benötigten interventionellen Hilfsmittels durch vorzugsweise zumindest einen Teil zumindest eines Katheters (K\_Cat) und/oder einer Katheterspitze (K\_Cat) und/oder zumindest eines Führungsdrahts und/oder zumindest einer Führungshilfe repräsentiert wird.
6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das interventionelle Hilfsmittel durch das sich Organisieren der zuvor unstrukturierten Catome temporär zu einer zuvor bestimmten Form ausgebildet wird.
7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Programmcode zumindest zu einem Teil auf den Catomen (Cat) und/oder zumindest zu einem weiteren Teil auf mindestens einer externen Recheneinheit ausgeführt wird, die mit den Catomen (Cat) kommunizieren kann.
8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Ziel-Bereich aus einem 3D-Bilddatensatz, insbesondere aus

dem in Anspruch 1 verwendeten 3D-Bilddatensatz segmentiert wird.

9. Verfahren nach dem vorhergehenden Anspruch, dadurch gekennzeichnet, dass die Segmentierung anhand gesetzter Markierungspunkte (S, E, AP, P\_ AP) durchgeführt wird.

10. Verfahren nach dem vorhergehenden Anspruch 8 oder 9, dadurch gekennzeichnet, dass der 3D-Bilddatensatz durch eine zeitbezogene Information zu einem 4D-Bilddatensatz ergänzt wird.

11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die von den Catomen (Cat) gebildete Form wieder aufgelöst wird.

12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die bestimmte Form auf einem dreidimensionalen Modell basiert, das Varianten einer bestimmten Grundform darstellt.

13. Verfahren nach Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche 1 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass die bestimmte Form auf einer vorgegebenen Standardform basiert.

14. Systemeinheit zur Organisation von aus Catomen (Cat) bestehenden Nanorobotern, geeignet zur Durchführung des Verfahrens nach einem der vorhergehenden Verfahrensansprüche, umfassend:

- Mehrere Nanoroboter, wobei jeder Nanoroboter, der zumindest einen Teil eines Programmcodes umfasst, wodurch die Nanoroboter zur Bildung mindestens eines Teils eines interventionellen Hilfsmittels mit Hilfe der Nanoroboter durch Kommunikation und Austausch von Information mit anderen Nanorobotern konfiguriert sind,
- wobei die Nanoroboter in einen Ziel-Bereich einbringbar oder eingebracht sind,
- wobei die Nanoroboter Mittel zur Ausführung des Programmcodes aufweisen, das in der Weise aktivierbar ist, dass ein sich Organisieren der zuvor unstrukturierten Catome zu dem mindestens einen Teil des benötigten interventionellen Hilfsmittels gemäß der zuvor bestimmten Form hervorrufbar ist.

15. Systemeinheit nach dem vorhergehenden Anspruch, dadurch gekennzeichnet, dass die Nanoroboter mit Hilfe eines Katheters in den Ziel-Bereich einbringbar sind.

16. Systemeinheit nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass als Auslöser der Aktivierung des Programmcodes ein Zeitgeber oder ein Positionssensor verwendbar ist.

17. Systemeinheit nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der

mindestens eine Teil des benötigten interventionellen Hilfsmittels in einem endovaskulären Ziel-Bereich eingesetzt werden kann.

18. Systemeinheit nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der mindestens eine Teil des benötigten interventionellen Hilfsmittels durch ein vollständiges interventionelles Hilfsmittel, vorzugsweise zumindest einen Stent, Coil, Katheter und/oder Führungsdraht, repräsentiert werden kann.

19. Systemeinheit nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der mindestens eine Teil des benötigten interventionellen Hilfsmittels durch vorzugsweise zumindest einen Teil zumindest eines Katheters (K\_Cat) und/oder Katheterspitze (K\_Cat) und/oder zumindest eines Führungsdrahts und/oder zumindest einer Führungshilfe repräsentiert werden kann.

20. Systemeinheit nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das interventionelle Hilfsmittel durch das sich Organisieren der zuvor unstrukturierten Catome temporär zu einer zuvor bestimmten Form ausgebildet ist.

21. Systemeinheit nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Programmcode zumindest zu einem Teil auf den Catomen (Cat) und/oder zumindest zu einem weiteren Teil auf mindestens einer externen Recheneinheit ausführbar ist, die mit den Catomen kommunizieren kann.

22. Systemeinheit nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die zuvor bestimmte Form auf einem dreidimensionalen Modell basiert, das Varianten einer Bestimmten Grundform darstellt.

23. Systemeinheit nach einem der vorhergehenden Ansprüche 14 bis 22, dadurch gekennzeichnet, dass die bestimmte Form auf einer vorgegebenen Standardform basiert.

Es folgen 10 Blatt Zeichnungen



Anhängende Zeichnungen

FIG 1A

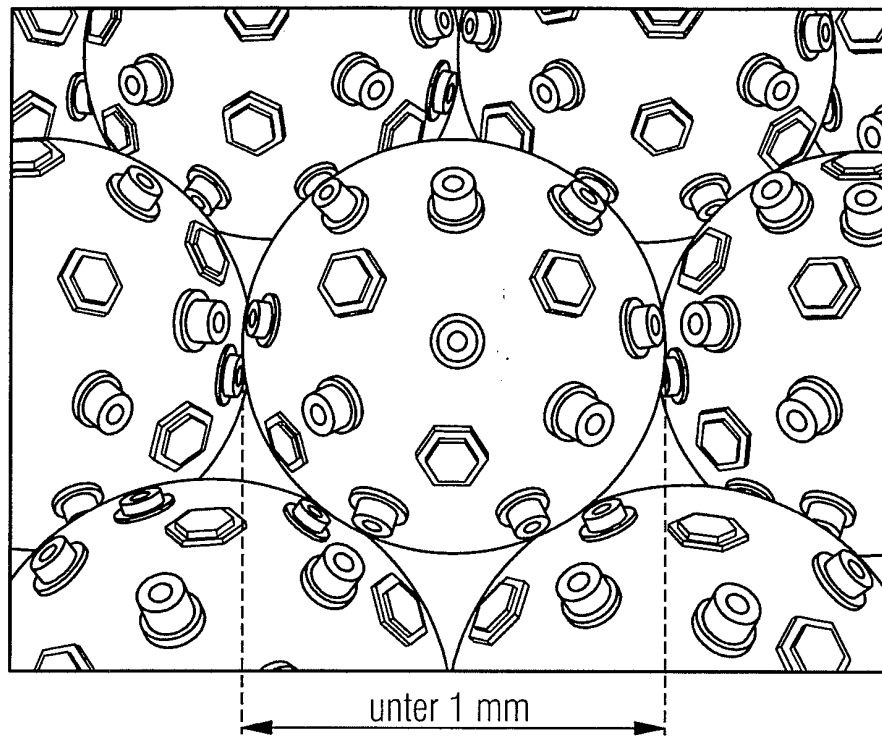


FIG 1B

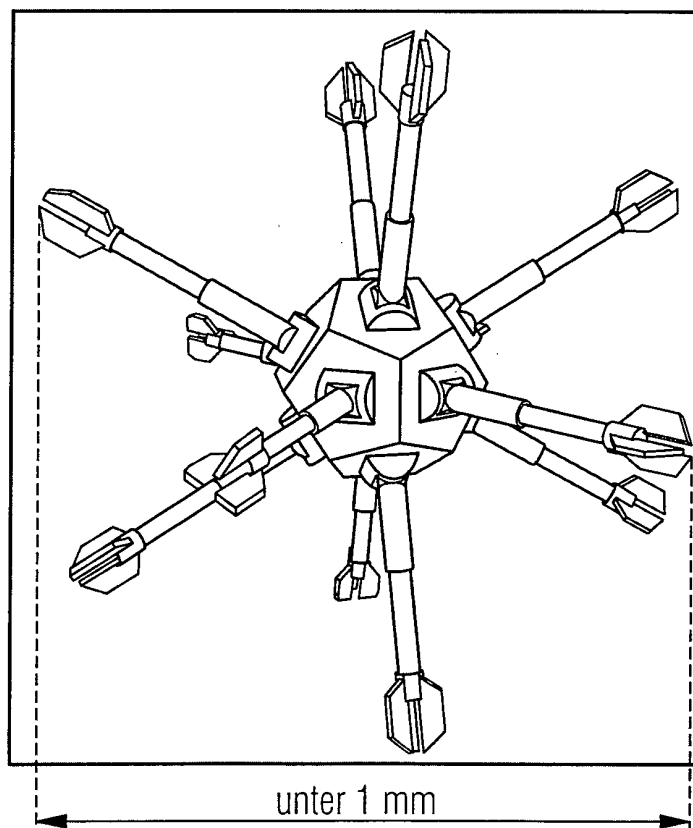


FIG 2C

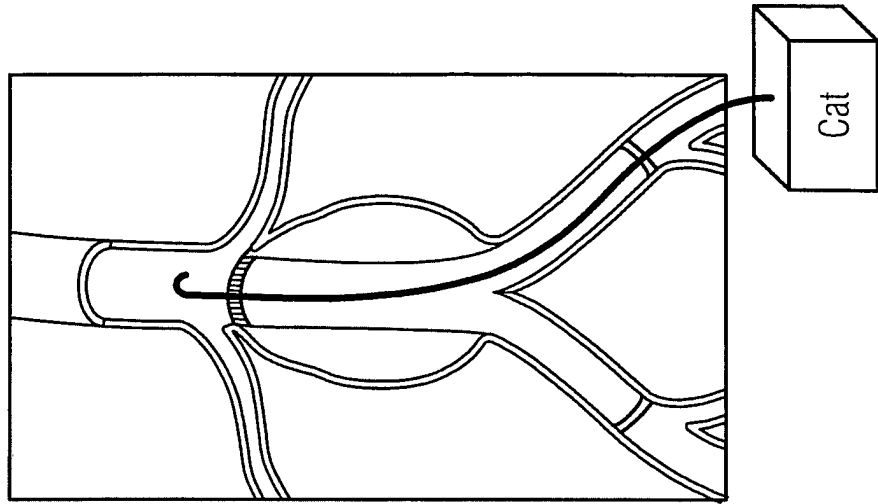


FIG 2B

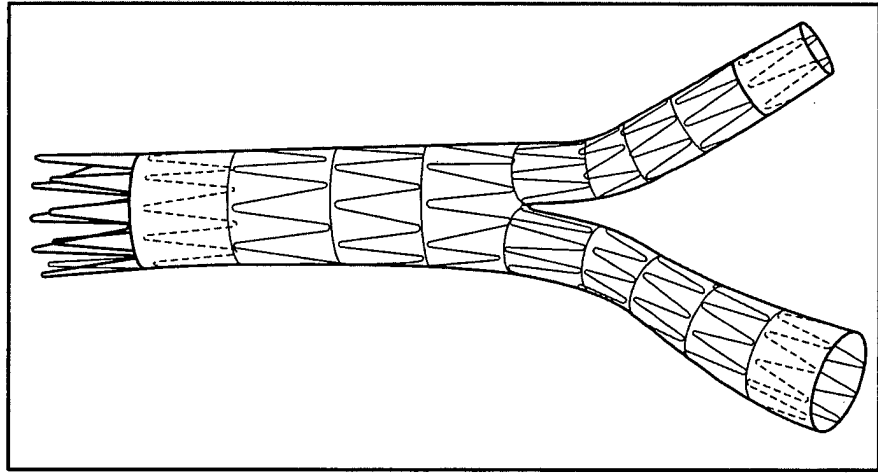


FIG 2A

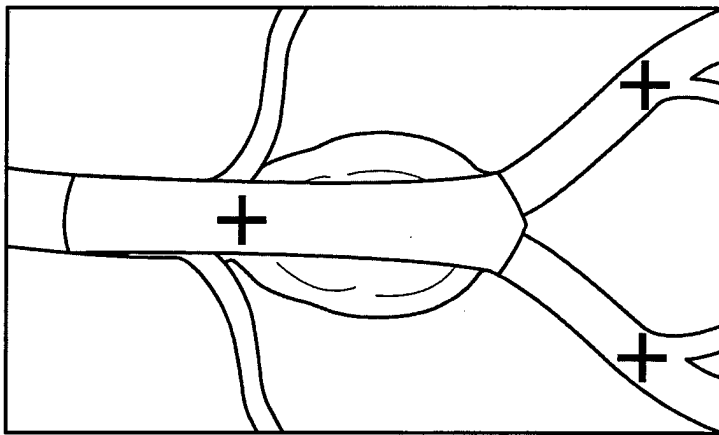


FIG 3C

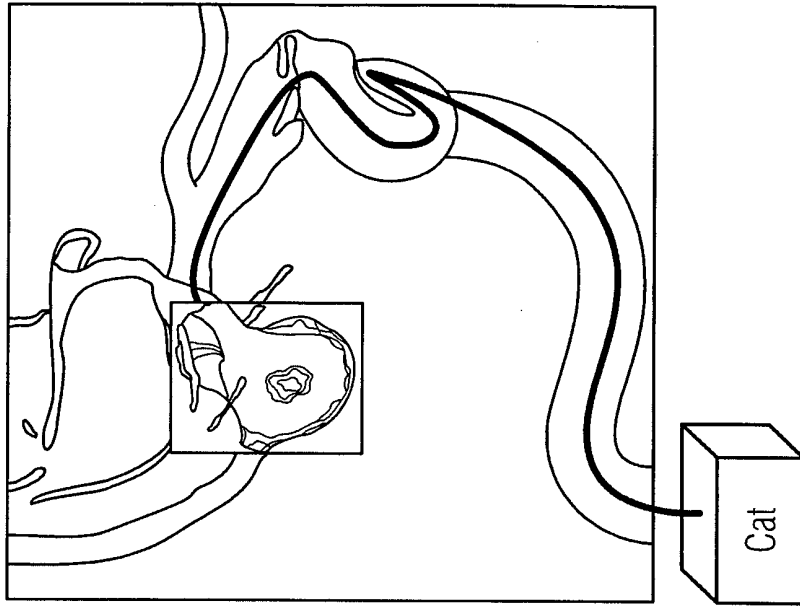


FIG 3B



FIG 3A

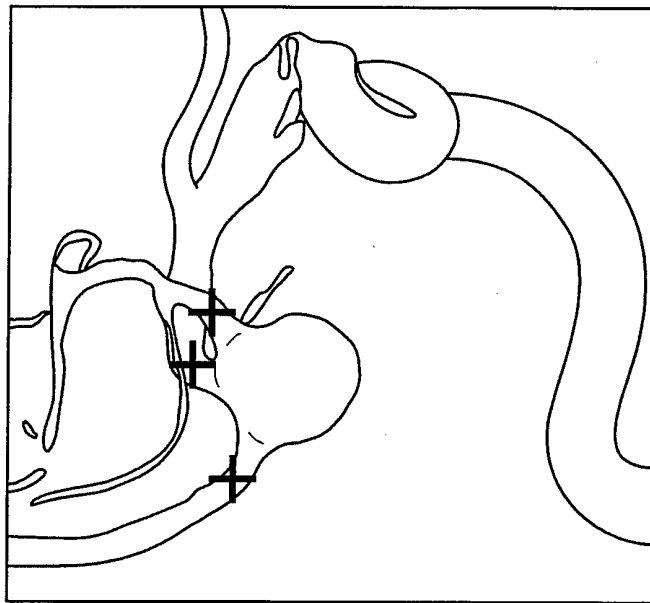


FIG 4A

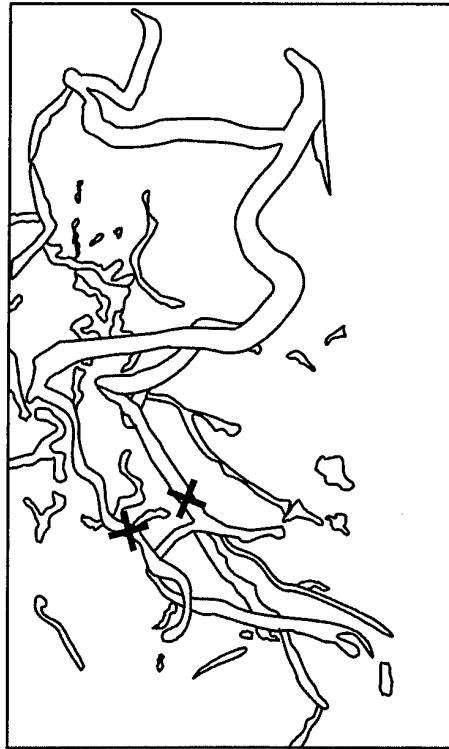


FIG 4B

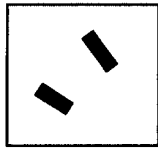
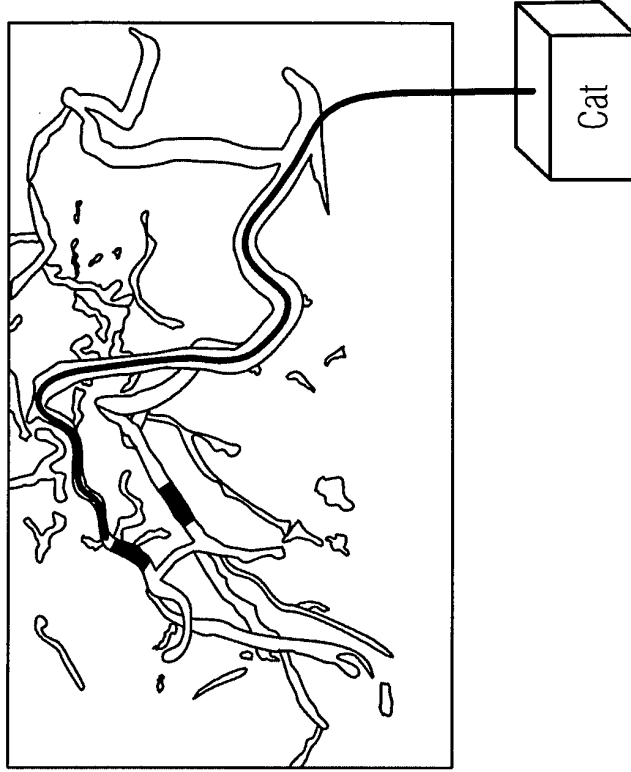


FIG 4C



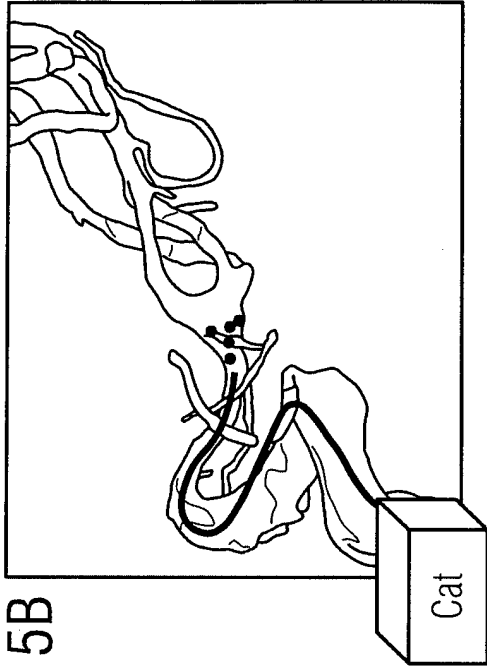


FIG 5B



FIG 5D

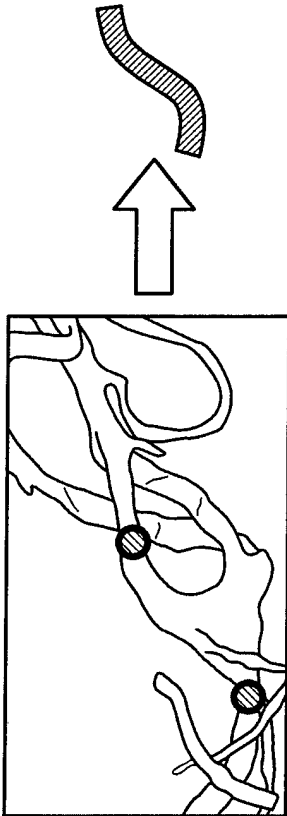


FIG 5A

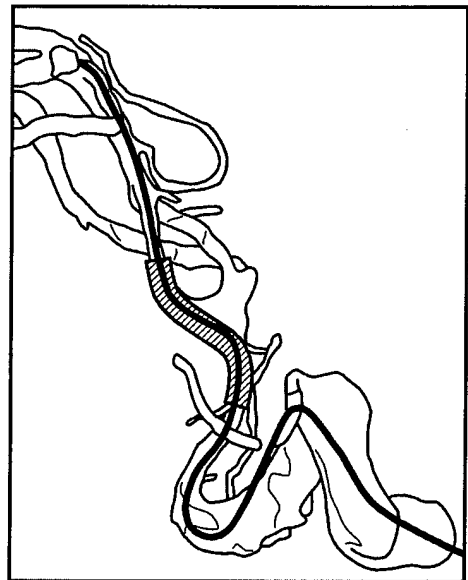


FIG 5C

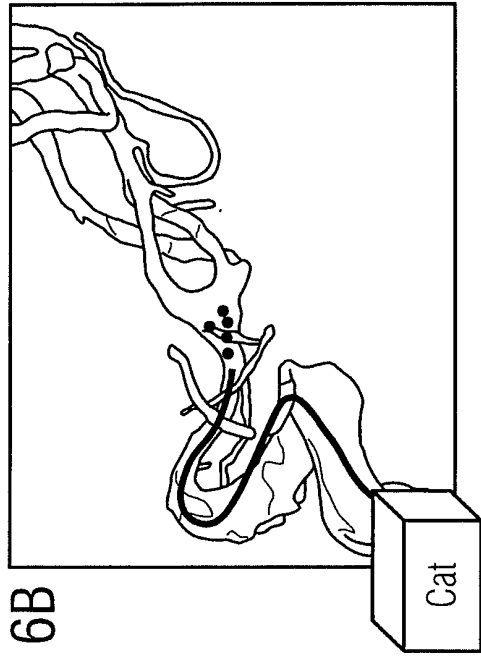


FIG 6B

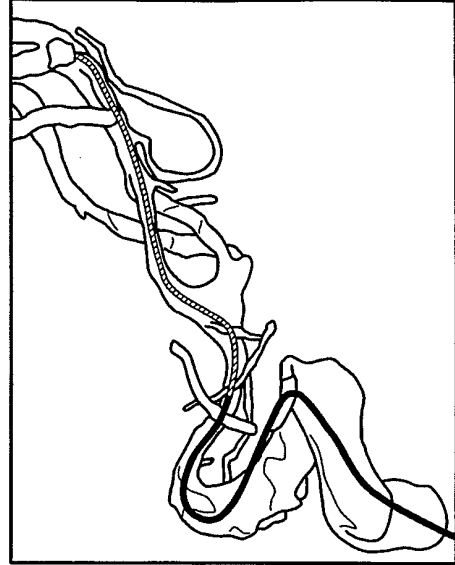


FIG 6D

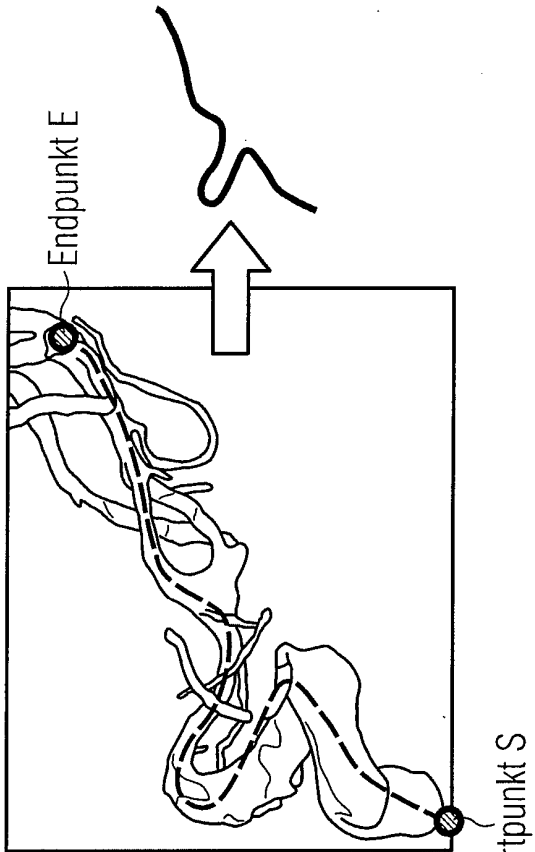


FIG 6A

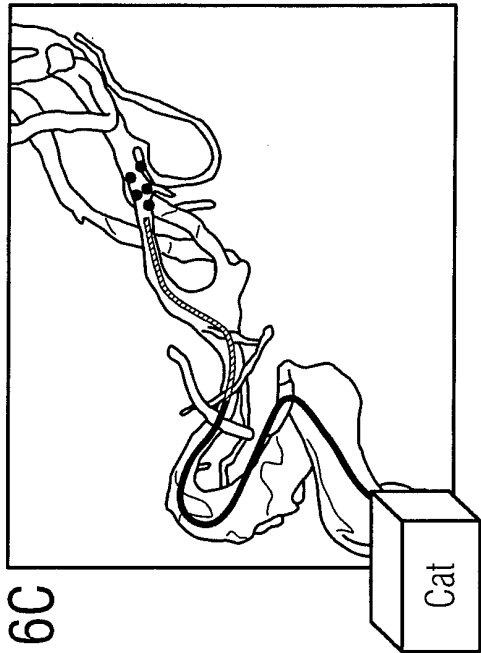


FIG 6C





FIG 7B

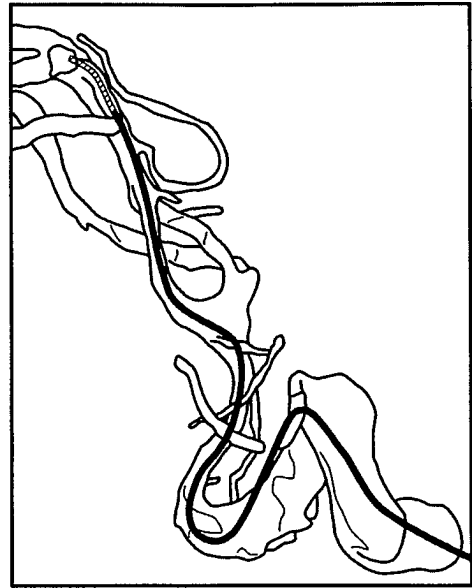


FIG 7D

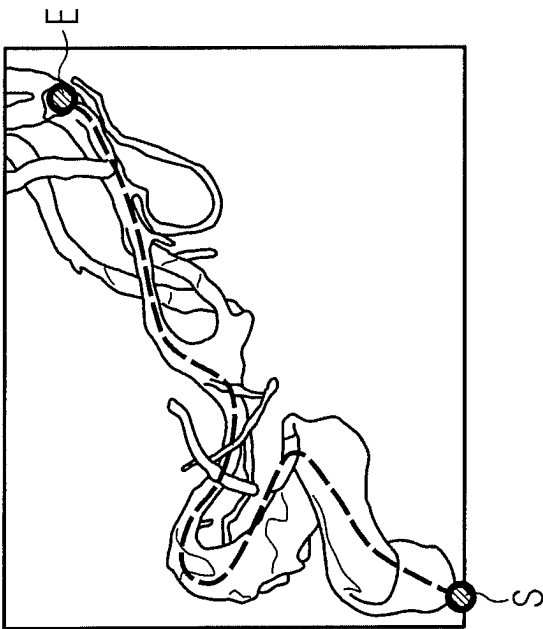


FIG 7A

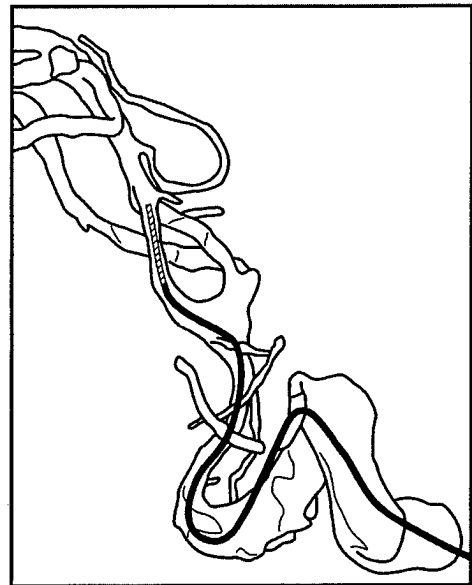


FIG 7C

FIG 8B

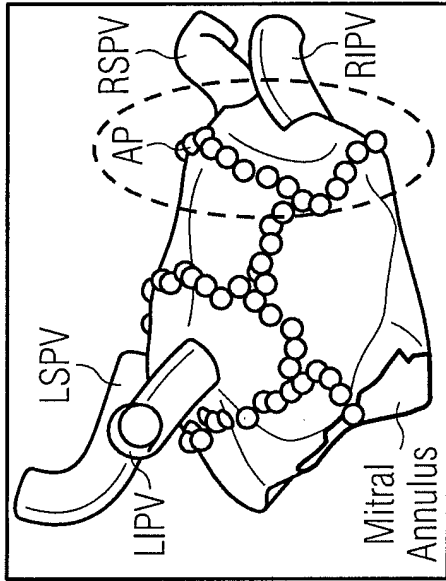


FIG 8D

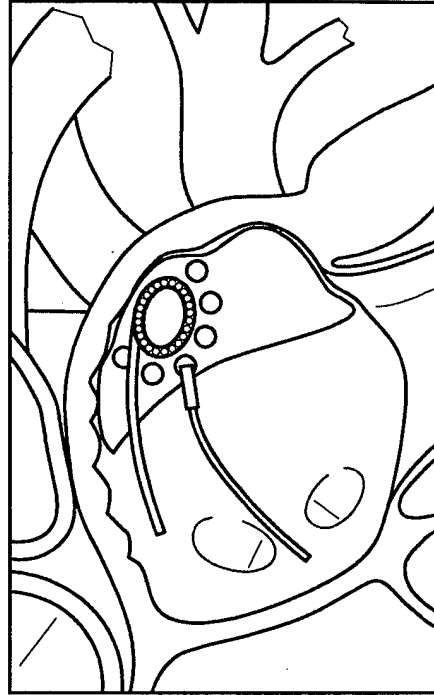


FIG 8A

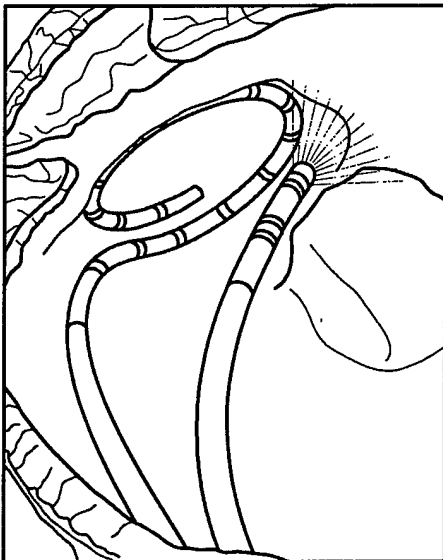


FIG 8C

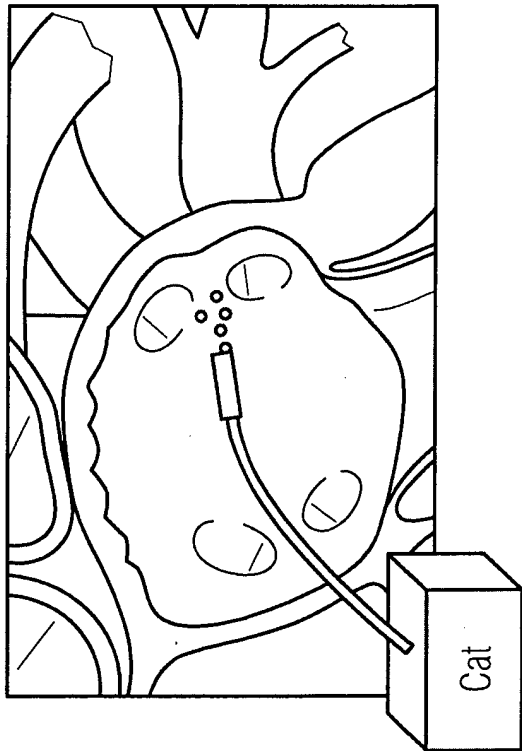


FIG 9B

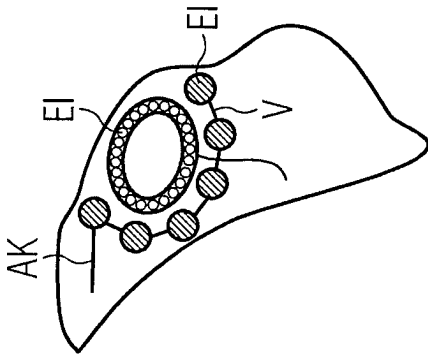


FIG 9D

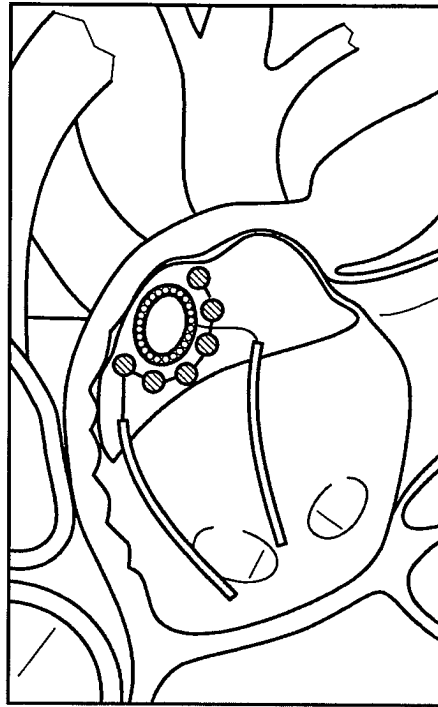


FIG 9A

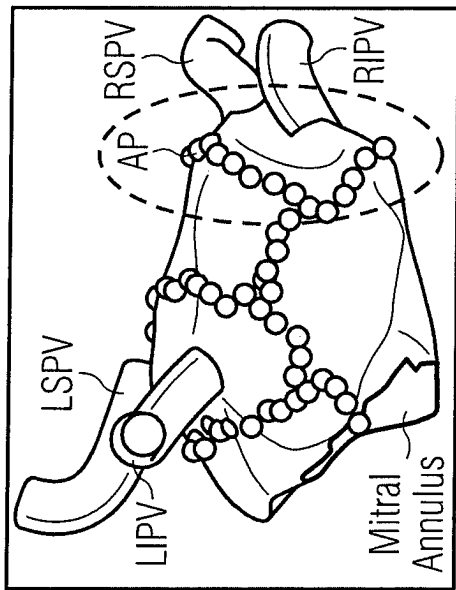


FIG 9C

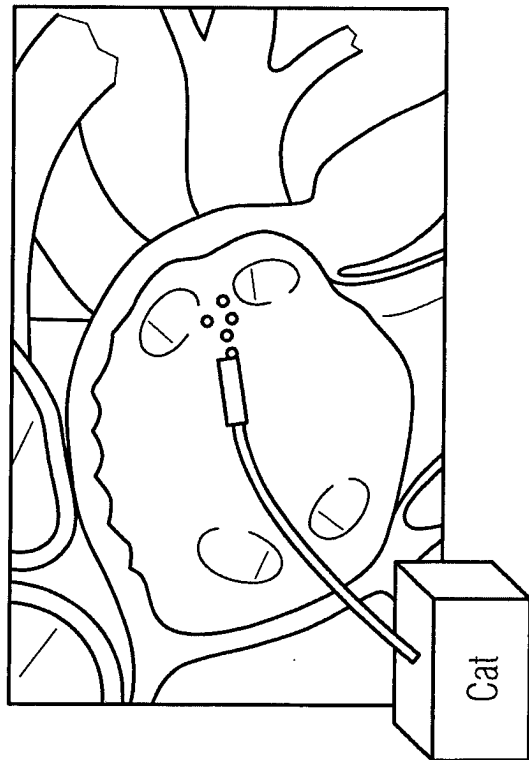


FIG 10B

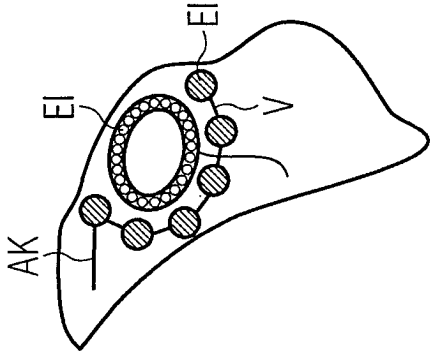


FIG 10D

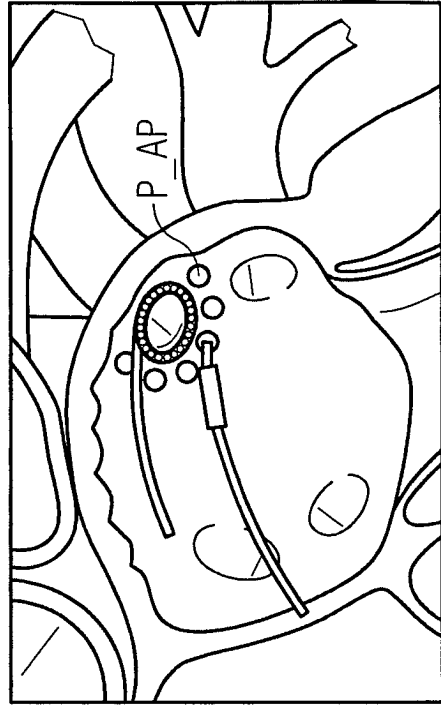


FIG 10A

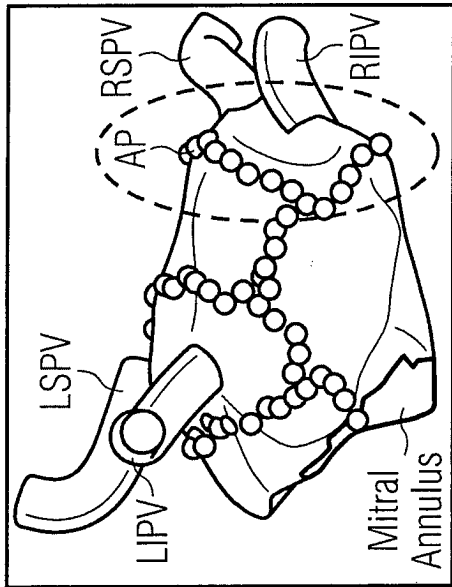


FIG 10C

