



(19)
 Bundesrepublik Deutschland
 Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 11 2004 001 464 B4** 2008.04.30

(12)

Patentschrift

(21) Deutsches Aktenzeichen: **11 2004 001 464.6**
 (86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/US2004/026423**
 (87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2005/017836**
 (86) PCT-Anmeldetag: **13.08.2004**
 (87) PCT-Veröffentlichungstag: **24.02.2005**
 (43) Veröffentlichungstag der PCT Anmeldung
 in deutscher Übersetzung: **29.06.2006**
 (45) Veröffentlichungstag
 der Patenterteilung: **30.04.2008**

(51) Int Cl.⁸: **G06T 7/40** (2006.01)

Innerhalb von drei Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 2 Patentkostengesetz).

(30) Unionspriorität:
60/494,909 **13.08.2003** **US**
10/915,071 **10.08.2004** **US**

(73) Patentinhaber:
Siemens Medical Solutions USA, Inc., Malvern, Pa., US

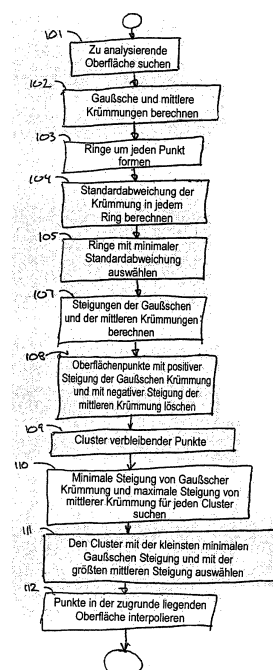
(74) Vertreter:
Fischer, M., Dipl.-Phys. Dr.-Ing., Pat.-Anw., Zürich, CH

(72) Erfinder:
Jerebko, Anna, West Chester, Pa., US

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht gezogene Druckschriften:
US 62 46 784 B1
KUBO M. et al.: "Extraction of pulmonary fissures from thin section CT images using calculation of surface curvatures and morphology filters".
INTERNATIONAL CONFERENCE ON IMAGE PROCESSING, 2000, PROCEEDINGS, IEEE, Vol. 2, 10. September 2000, pp. 637-640;

(54) Bezeichnung: **Verfahren zum Analysieren von lokalen Mustern in Krümmungsverteilungen**

(57) Hauptanspruch: Verfahren zum Erkennen von Gewebeveränderungen und Polypen in einem digitalen Bild, wobei das Bild eine Vielzahl von 3D-Volumenpunkten umfasst, wobei das Verfahren die folgenden Schritte umfasst:
 a) eine dreidimensionale Oberfläche wird in dem besagten Bild identifiziert;
 b) ein erstes Krümmungsmass wird für jeden Punkt auf der identifizierten Oberfläche berechnet;
 c) für jeden Punkt auf der identifizierten Oberfläche wird eine Gruppe von Ringen, bestehend aus benachbarten Punkten auf der identifizierten Oberfläche, um jeden der besagten Punkte geformt, sodass jeder der besagten Punkte für jeden Ring seiner Gruppe von Ringen ein Mittelpunkt ist, wobei jeder Punkt eines Rings einen gleichen geodätischen Abstand vom Mittelpunkt für den Ring aufweist;
 d) eine Standardabweichung von dem jeweils zugehörigen ersten Krümmungsmass wird für jeden Ring berechnet;
 e) es werden diejenigen Ringe ausgewählt, die bezogen auf ihren jeweiligen Mittelpunkt die minimale Standardabweichung für das erste Krümmungsmass aufweisen;
 f) für diese...



Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zum Erkennen von Gewebeveränderungen und Polypen in einem digitalen Bild.

[0002] Durch die diagnostisch überlegenen, aus Daten moderner Bildsysteme gewonnenen Informationen können potentielle Probleme in einem früheren Stadium erkannt und besser behandelt werden. Angesichts der riesigen Mengen der von Bildsystemen gelieferten detaillierten Daten müssen verschiedene Algorithmen für die effiziente und genaue Verarbeitung der Bilddaten entwickelt werden. Mit Hilfe von Computern werden Fortschritte bei der Bildverarbeitung im Allgemeinen an digitalen oder digitalisierten Bildern erzielt.

[0003] Zu den digitalen Erfassungssystemen zum Erzeugen digitaler Bilder gehören digitale Röntgenradiographie, Computertomographie-("CT"-)Bildgebung, Magnetresonanztomographie-("MRT"-) oder Kernspintomographie-Bildgebung, Ultraschall-("US"-) und nuklearmedizinische Abbildungsverfahren, wie etwa Positronenemissionstomographie ("PET") und Single-Photon-Emissionscomputertomographie ("SPECT"). Digitale Bilder können auch aus analogen Bildern erzeugt werden, zum Beispiel durch Scannen analoger Bilder wie etwa typischer Röntgenaufnahmen zu einer digitalisierten Form. Bei großen Mengen digitaler Daten in digitalen Bildern ist die Interpretation ohne zusätzliche Hilfe für den Menschen, z.B. einen Arzt, jedoch schwierig und ermüdend. Computergestützte Diagnose- („CAD“-)Systeme spielen bei der Hilfe für den Menschen eine entscheidende Rolle, insbesondere bei der Visualisierung, der Segmentierung, der Erkennung, der Registrierung und der Berichterstattung medizinischer Pathologien.

[0004] Digitale Bilder werden aus einer Matrix numerischer Werte erzeugt, die eine Eigenschaft darstellen (z.B. den Graustufenwert oder die magnetische Feldstärke), welche anatomischen Lokalisierungspunkten zugewiesen werden kann, auf die durch einen bestimmten Matrixort Bezug genommen wird. Die Gruppe von anatomischen Lokalisierungspunkten umfasst die Domäne des Bildes. Bei digitalen 2D-Bildern oder Segmentabschnitten werden die diskreten Matrixorte Pixel genannt. Digitale dreidimensionale Bilder können mit Hilfe verschiedener nach dem Stand der Technik bekannter Verfahren aus gestapelten Segmentabschnitten erzeugt werden. Die digitalen 3D-Bilder bestehen aus diskreten Volumenelementen, die auch als Voxel bezeichnet werden und sich aus Pixeln der 2D-Bilder zusammensetzen. Die Eigenschaften der Pixel oder Voxel können verarbeitet werden, um verschiedene Eigenschaften über die Anatomie des Patienten zu ermitteln, die mit solchen Pixeln oder Voxeln in Zusammenhang steht.

[0005] Wenn anatomische Bereiche und Strukturen durch die Analyse von Pixeln und/oder Voxeln erstellt und ausgewertet worden sind, können eine nachfolgende Verarbeitung und Analyse durch Verwendung der Eigenschaften und Merkmale auf relevante Bereiche angewandt werden, wodurch die Genauigkeit und auch die Wirtschaftlichkeit des Bilderzeugungssystems verbessert werden.

[0006] Eine der entscheidenderen CAD-Aufgaben besteht im Screening und im frühen Erkennen verschiedener Krebsarten aus einem Volumendatenwert (z.B. einem CT-Volumendatenwert). Bei Krebs wie z.B. Dickdarmkrebs konnte ein Rückgang der Sterblichkeitsrate aufgrund der frühen Erkennung und der Beseitigung von krebsartigen Tumoren beobachtet werden. Pathologien sind normalerweise in Bezug auf ihre geometrische Form kugel- oder halbkugelförmig. In vielen Fällen liegen diese kugelförmigen Pathologien an linearen oder abschnittsweise linearen Oberflächen an. Dickdarmpolypen ragen beispielsweise von der Dickdarmwand und von Falten ab und in das Lumen hinein. Leider werden im Allgemeinen charakteristische Symptome mit vorhandenen Verfahren erst in einem fortgeschrittenen Stadium der Krankheit erkannt. Ein vorrangiges Ziel zur Verbesserung des präventiven Krebs-Screening besteht daher darin, eine frühere Erkennung der charakteristischen Symptome bereitzustellen.

[0007] Im Stand der Technik sind bereits Verfahren bekannt, die charakteristische Krümmungen in CT-Bildern ausnutzen, um anatomisch auffällige Strukturen aufzuspüren. Beispielhaft für diesen Stand der Technik werden genannt das US-Patent 6,246,784 und ein Konferenzbeitrag von Kubo M. et al: "Extraction of pulmonary fissures from thin section CT images using calculation of surface curvatures and morphology filters"; International Conference on Image Processing, 2000, Proceedings; IEEE, vol.2, 10. September 2000, pp. 637 bis 640.

[0008] Aus diesem Stand der Technik geht jedoch kein Verfahren hervor, mit dem sich mit einem hohen Verlässlichkeitsgrad exakte Diagnosen hinsichtlich des tatsächlichen Vorhandenseins derartiger pathologischer Anomalien ableiten lassen. Der vorliegenden Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zum Erkennen von Gewebeveränderungen und Polypen in einem digitalen Bild anzugeben, die diese Gewebeveränderungen sehr zuverlässig automatisiert identifizieren lässt.

Zusammenfassung der Erfindung

[0009] Erfindungsgemäss wird daher zur Lösung der vorstehend genannten Aufgabe ein Verfahren zum Erkennen von Gewebeveränderungen und Polypen in einem digitalen Bild offenbart, wobei das Bild eine Vielzahl von 3D-Volumenpunkten umfasst, und wobei das Verfahren die folgenden Schritte umfasst:

- a) eine dreidimensionale Oberfläche wird in dem besagten Bild identifiziert;
- b) ein erstes Krümmungsmass wird für jeden Punkt auf der identifizierten Oberfläche berechnet;
- c) für jeden Punkt auf der identifizierten Oberfläche wird eine Gruppe von Ringen, bestehend aus benachbarten Punkten auf der identifizierten Oberfläche, um jeden der besagten Punkte geformt, sodass jeder der besagten Punkte für jeden Ring seiner Gruppe von Ringen ein Mittelpunkt ist, wobei jeder Punkt eines Rings einen gleichen geodätischen Abstand vom Mittelpunkt für den Ring aufweist;
- d) eine Standardabweichung von dem jeweils zugehörigen ersten Krümmungsmass wird für jeden Ring berechnet;
- e) es werden diejenigen Ringe ausgewählt, die bezogen auf ihren jeweiligen Mittelpunkt die minimale Standardabweichung für das erste Krümmungsmass aufweisen;
- f) für diese ausgewählten Ringe wird eine erste Krümmungs-Steigung berechnet; und
- g) es werden jene Punkte von der identifizierten Oberfläche gelöscht, bei denen die erste Krümmungs-Steigung von den für einen Polypen oder eine Gewebeveränderung erwarteten Mustern abweicht.

[0010] Unter einem weiteren Aspekt der Erfindung beinhaltet das Verfahren das Clustering der verbleibenden Punkte in der besagten Oberfläche zur Bildung von einem oder mehreren Clustern, für jeden Cluster Berechnen eines Extremwerts für die erste Krümmungs-Steigung, Auswählen des Cluster mit dem größten Extremwert von allen Extremwerten der ersten Krümmungs-Steigung, und Kennzeichnen des ausgewählten Cluster als eine interessierende Gewebeveränderung, und Interpolation einer zugrunde liegenden Oberfläche der interessierenden Gewebeveränderung. Die zugrunde liegende Oberfläche trennt die Gewebeveränderung vom Gewebe unterhalb der Gewebeveränderung.

[0011] Unter einem weiteren Aspekt der Erfindung wird ein Verfahren zur Erkennung von Gewebeveränderungen und Polypen in einem digitalen Bild bereitgestellt, wobei das Bild eine Vielzahl von 3D-Volumenpunkten umfasst. Das Verfahren beinhaltet die Identifizierung einer Oberfläche in dem Bild, das Berechnen einer Gaußschen Krümmung und einer mittleren Krümmung für jeden Punkt in der Oberfläche, für jeden Punkt in der Oberfläche Erzeugen einer Gruppe von Ringen von Punkten um jeden der besagten Punkte, wobei jeder der besagten Punkte in Bezug auf seine Gruppe von Ringen ein Mittelpunkt ist, wobei jeder Ring einen gleichen geodätischen Abstand vom Mittelpunkt für den Ring aufweist, Berechnen für jeden Ring einer Standardabweichung der Gaußschen Krümmung und einer Standardabweichung der mittleren Krümmung, Auswählen der Ringe mit einem Minimum der Standardabweichung für die Gaußsche Krümmung und die mittlere Krümmung, Berechnen für die ausgewählten Ringe einer Steigung der Gaußschen Krümmung und einer Steigung mittleren Krümmung und Löschen jener Punkte aus der Oberfläche, bei denen die Steigung der Gaußschen Krümmung größer als oder gleich null ist oder wo die Steigung der mittleren Krümmung geringer als oder gleich null ist.

[0012] Unter einem weiteren Aspekt der Erfindung beinhaltet das Verfahren das Clustering der verbleibenden Punkte in der besagten Oberfläche zur Bildung von einem oder mehreren Clustern, für jeden Cluster Berechnen eines Minimums der Steigung der Gaußschen Krümmung und eines Maximums der Steigung der mittleren Krümmung, Auswählen des Cluster mit der geringsten Steigung der Gaußschen Krümmung und der größten Steigung der mittleren Krümmung und Kennzeichnen des ausgewählten Cluster als eine interessierende Gewebeveränderung und Interpolieren einer zugrunde liegenden Oberfläche der interessierenden Gewebeveränderung. Die zugrunde liegende Oberfläche trennt die besagte Gewebeveränderung vom Gewebe unterhalb der Gewebeveränderung.

[0013] Unter einem weiteren Aspekt der Erfindung wird eine von einem Computer auslesbare Programmspeichereinheit bereitgestellt, die konkret ein Programm von durch den Computer ausführbaren Befehlen enthält, um die Verfahrensschritte zum Erkennen von Gewebeveränderungen und Polypen in einem digitalen Bild auszuführen, wobei das Bild eine Vielzahl von 3D-Volumenpunkten umfasst. Das Verfahren beinhaltet die Identifizierung einer Oberfläche in dem Bild, das Berechnen eines ersten Krümmungsmaßes für jeden Punkt in der Oberfläche, für jeden Punkt in der Oberfläche das Erzeugen einer Gruppe von Ringen von Punkten um jeden der besagten Punkte, wobei jeder der besagten Punkte in Bezug auf seine Gruppe von Ringen ein Mittelpunkt ist, wobei jeder Ring einen gleichen geodätischen Abstand vom Mittelpunkt für den Ring aufweist, Berechnen für jeden Ring einer Standardabweichung des ersten Krümmungsmaßes, Auswählen der Ringe mit einem Minimum der Standardabweichung für das erste Krümmungsmaß, Berechnen für die ausgewählten Ringe einer ersten Krümmungs-Steigung und Löschen jener Punkte aus der Oberfläche, bei denen die Krümmungs-Steigung

gung von dem für einen Polypen oder eine Gewebeveränderung erwarteten Muster abweicht.

[0014] Unter einem weiteren Aspekt der Erfindung beinhaltet das Verfahren das Clustering der verbleibenden Punkte in der besagten Oberfläche zur Bildung von einem oder mehreren Clustern, für jeden Cluster Berechnen eines Extremwerts der ersten Krümmungs-Steigung, Auswählen des Cluster mit dem größten Extremwert von allen Extremwerten der ersten Krümmungs-Steigung, und Kennzeichnen des ausgewählten Cluster als eine interessierende Gewebeveränderung, und Interpolation einer zugrunde liegenden Oberfläche der interessierenden Gewebeveränderung. Die besagte zugrunde liegende Oberfläche trennt die Gewebeveränderung vom Gewebe unterhalb der Gewebeveränderung.

Kurze Beschreibung der Zeichnungen

[0015] [Abb. 1](#) zeigt ein Flussdiagramm eines bevorzugten Verfahrens der Erfindung

[0016] [Abb. 2](#) zeigt ein Beispiel einer kosinusförmigen Krümmungsverteilung

[0017] [Abb. 3a](#) und [Abb. 3b](#) zeigen einen Dickdarmpolypen mit überlagerten Ringen und einen Dickdarmpolypen mit einem überlagerten Zentrum, Inflexions-Gürtel (inflection belt) und den radialen Richtungen einer Krümmungsberechnung.

[0018] [Abb. 4](#) stellt eine Streukurve von Krümmungspunkten gemeinsam mit den Computer-Krümmungssteigungen für S_K und S_H dar.

[0019] [Abb. 5](#) zeigt ein beispielhaftes Computersystem zum Umsetzen einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung.

Ausführliche Beschreibung der bevorzugten Ausführungsformen

[0020] Veranschaulichende Ausführungsformen der Erfindung werden nachfolgend beschrieben. Aus Gründen der Klarheit werden nicht alle Merkmale einer praktischen Ausführung bei dieser Spezifikation beschrieben. Es ist natürlich klar, dass bei der Entwicklung einer derartigen tatsächlichen Ausführungsform zahlreiche umsetzungsspezifische Entscheidungen getroffen werden müssen, um die spezifischen Ziele des Entwicklers zu erreichen, z.B. die Verträglichkeit mit systembezogenen und businessbezogenen Einschränkungen, die sich von einer zur anderen Ausführungsform unterscheiden können. Darüber hinaus ist klar, dass ein derartiger Entwicklungsaufwand komplex und zeitaufwendig sein kann, mit den Vorteilen dieser Erfindung für den Fachmann trotzdem ein routinemäßiges Unterfangen.

[0021] Für die Erfindung sind zwar diverse Änderungen und alternativen Formen möglich, spezifische Ausführungsformen von ihr sind in den Zeichnungen beispielhaft gezeigt und hier ausführlich beschrieben. Es sollte jedoch klar sein, dass die Erfindung durch die vorliegende Beschreibung spezifischer Ausführungsformen nicht auf die bestimmten beschriebenen Formen beschränkt werden soll, vielmehr besteht die Absicht, dass alle Modifikationen, Äquivalente und Alternativen in den Geist und den Umfang der Erfindung entsprechend den anhängenden Ansprüchen einbezogen sind.

[0022] Die nachfolgend beschriebenen Verfahren betreffen das Auffinden von abnormalen Strukturen in medizinischen volumetrischen 3D-Bildern, beispielsweise, ohne auf diese beschränkt zu sein, CT- oder MRI-Bilder. Das Verfahren kann auf das Erkennen und Charakterisieren von Polypen oder anderen Gewebeveränderungen auf Oberflächen von hohlen Organen im menschlichen Körper wie z.B. Luftwege, Dickdarm, Harn- oder Gallenblase, das Auffinden von Plaque-Bildung in Arterien usw. angewandt werden. Vor der Anwendung von den Verfahren der Erfindung wurden volumetrische 3D-Bilder vorverarbeitet, um die Oberfläche des interessierenden Organs zu Erkennen. Jedes Erkennungsverfahren für eine Organoberfläche, bei welcher es sich um die Grenze zwischen dem Gewebe von hohlen Organen und Luft oder Flüssigkeit oder anderer Materie handelt (z.B. Stuhl im Dickdarm) kann verwendet werden, z.B. ein 3D-Canny-Kantendetektor.

[0023] Vorhandene Verfahren zur Analyse der Krümmung und Form eines Darmpolypen berücksichtigen, dass Teile des Polypen oder die Polypenoberfläche eine kugelige oder elliptische Form aufweisen. Allerdings tritt längs des Randes, wo der Polyp von der Dickdarmwand abragt, ein Krümmungsübergang auf. Die hier beschriebenen Verfahren beruhen auf einer Analyse der Krümmungsverteilung längs des geodätischen Abstands vom Mittelpunkt der interessierenden Polypenoberfläche in Richtung des Teils der Oberfläche, wo der Polyp in das umgebende Gewebe übergeht. Diese Verfahren beruhen auf der Annahme, dass Voxel in unmittelbarer

Nähe des Polypenzentrums auf der Oberfläche Gewebeveränderung eine Krümmung aufweisen, deren Betrag ein Maximum aufweist und dass der Betrag der Krümmung abnimmt, wenn man sich vom Zentrum der Gewebeveränderung fortbewegt.

[0024] Verschiedene Krümmungsmessungen, z.B. der Gaußschen Krümmung, der Prinzipalkrümmung, der mittleren Krümmung, Minimumkrümmung, Maximumkrümmung, und ihre Muster können gemeinsam oder getrennt betrachtet werden. Beispielsweise nimmt die Gaußsche Krümmung mit der Zunahme des geodätischen Abstands von Zentrum der Polypenoberfläche ab und wird negativ oder gleich null, wo der Polyp in das umgebende Gewebe übergeht. Die mittlere Krümmung folgt dem entgegengesetzten Muster.

[0025] Bei den bevorzugten Verfahren der Erfindung werden mindestens die mittlere oder die Gaußsche Krümmung in allen Punkten (Voxel) auf der Oberfläche berechnet, und vorzugsweise werden sowohl die mittlere als auch die Gaußsche Krümmung berechnet. Es ist zu beachten, dass andere Messungen der Oberflächenkrümmung verwendet werden können, ohne den Umfang der Erfindung zu verlassen. Die Erfindung wird zwar im Hinblick auf Gaußsche und mittlere Krümmungen erklärt, die hier beschriebenen Verfahren sind jedoch nicht auf die beschriebenen Krümmungsmessungen beschränkt. Vorhandene Verfahren für die Analyse der Krümmung und der Form von Gewebeveränderungen berücksichtigen, dass Teile der Gewebeveränderungen oder ihrer Oberfläche eine kugelförmige oder elliptische Form haben. Hier wird die Annahme getroffen, dass die interessierenden Gewebeveränderungen von einer Organoberfläche abragen und eine mehr oder weniger symmetrische Form haben, wobei die Betonung auf Symmetrie liegt. Die Krümmung von konzentrischen Ringen auf einer Gewebeveränderung, die auf den oberen zentralen Punkt der Gewebeveränderung ausgerichtet ist, hat gewöhnlich innerhalb des Ringes eine kleine Varianz und folgt einem bestimmten Muster: die Krümmung verändert sich allmählich von der oberen Partie der Gewebeveränderung zu dem Teil der Oberfläche hin, wo die Gewebeveränderung in das umgebende Gewebe übergeht. Diese Verfahren könnte auch angewandt werden, um einen Hohlraum in der Oberfläche eines Organs zu finden, beispielsweise Dickdarmdivertikel, da die Krümmung dann einem umgekehrten Muster folgen würde.

[0026] Die Analyse der Krümmungsverteilung wird längs des radialen Abstands vom Zentrum der vorausgerichteten Gewebeveränderung ausgeführt und beinhaltet den Teil der Oberfläche, wo der Polyp in das umgebende Gewebe übergeht. Voxel in unmittelbarer Nähe vom Zentrum des Polypen auf der Oberfläche der Gewebeveränderung würden eine maximale Gaußsche Krümmung haben, und diese Gaußsche Krümmung nimmt mit wachsendem Abstand vom Zentrum des Polypen ab und wird negativ oder nahe null, wo der Polyp in das umgebende Gewebe übergeht ([Abb. 1](#)). Die mittlere Krümmung folgt dem entgegengesetzten Muster.

[0027] Bei der Betrachtung der Gaußschen Krümmung kann das üblichste Muster der Krümmungsverteilung längs dem Radius in allen Richtungen vom Mittelpunkt ausgehend in erster Näherung als Kosinusfunktion beschrieben werden: eine maximale Krümmung im Mittelpunkt, allmählich mit der Entfernung abnehmend, am Inflexions-Gürtel möglicherweise negativ werdend und dann wieder ansteigend. Kosinusförmige Krümmungsübergangsmuster kennzeichnen mögliche Polypen mit einer mehr oder weniger runden Form. In [Abb. 2](#) ist ein Beispiel einer kosinusförmigen Krümmungsverteilung dargestellt. Nichtflache Gewebeveränderungen wie Dickdarpolypen und Gewebeveränderungen der Luftwege ragen von der Dickdarmwand und von Falten einer gesunden Oberfläche ab und in das Lumen hinein. Längs der Kante des herausragenden Objekts treten Krümmungsübergänge auf. Durch unebene Oberflächen von Gewebeveränderungen, wie etwa abgeflachte oder lang gestreckte oder unregelmäßige Polypenformen und angelagerte faltenähnliche Strukturen, wird ein nichtideales Verhalten verursacht. Die Krümmungsmuster weichen fortschreitend in dem Maße von der Kosinusform ab, wie die Oberfläche ihre ideale halbkugelförmige Form verliert. Die tatsächlichen Krümmungswerte könnten über einen beträchtlich breiten Winkel verstreut sein. Eine Mehrzahl der Gewebeveränderungen folgt allerdings anders als bei gesunden Strukturen desselben Organs einem "Kosinus"-Muster der Oberflächenkrümmungsverteilung, wodurch es möglich wird, ein „Kosinus“-Krümmungsverteilungsmuster als Merkmal für ein automatisches Erkennen einer Gewebeveränderung zu verwenden. Im Gegensatz zu Verfahren, bei denen die Kugelform oder die Krümmungen selbst, darunter Gaußsche, mittlere und Prinzipalkrümmung, im Mittelpunkt stehen, ist die Krümmungs-Steigung in Kombination mit der Standardabweichung der Krümmung im Inflexions-Gürtel ein vom Maßstab unabhängiges Maß für die Rundheit und die Symmetrie einer Gewebeveränderung.

[0028] Ein bevorzugtes Verfahren der Erfindung beinhaltet intensitätsbasierte berechnete Krümmungen an allen Punkten längs der Innenwand eines Organs. An jedem Ort wird ein Streugraph einer Krümmungsverteilung innerhalb eines Radius der ausgewählten Positionen berechnet und anschließend ausgewertet. Nun Bezug nehmend auf [Abb. 1](#) so wird bei Schritt **101** zunächst ein 3D-Kantenerkennungsverfahren auf ein interessierendes Volumen angewandt, um die Oberflächen-Voxel der Innenwand des Organs zu finden. Ein nicht ein-

schränkendes Beispiel eines Katernerkennungsverfahrens ist der Canny-Kantendetektor, der dünne und fortlaufende Kanten erzeugt.

[0029] Nachdem eine Oberfläche erkannt worden ist, werden in Schritt **102** das Mittel (H) und/oder die Gaußsche Krümmung (K) für jeden Oberflächen-Voxel berechnet. Für ein Grauwert-Bild $I(x, y, z)$ können die Gaußsche Krümmung (K) und die mittlere Krümmung (H) wie folgt definiert werden:

$$K = \frac{1}{h^2} \begin{bmatrix} I_x^2(I_{yy}I_{zz} - I_{yz}^2) + 2I_yI_z(I_{xz}I_{xy} - I_{xx}I_{yz}) \\ + I_y^2(I_{xx}I_{zz} - I_{yz}^2) + 2I_xI_z(I_{yz}I_{xy} - I_{yy}I_{xz}) \\ + I_z^2(I_{xx}I_{yy} - I_{xy}^2) + 2I_xI_y(I_{xz}I_{yz} - I_{zz}I_{xy}) \end{bmatrix}$$

(1)

$$H = \frac{1}{2h^{3/2}} \begin{bmatrix} I_x^2(I_{yy} + I_{zz}) - 2I_yI_zI_{yz} \\ + I_y^2(I_{xx} + I_{zz}) - 2I_xI_yI_{xz} \\ + I_z^2(I_{xx} + I_{yy}) - 2I_xI_yI_{xy} \end{bmatrix}$$

(2)

wobei $I(x, y, z)$ die Intensitäten im Scheitelpunkt für eine Oberfläche $(x, y, z) \in \mathbb{R}^3$ darstellt, I_x die partielle Ableitung der Bilddaten in Bezug auf x angibt, I_{xz} die gemischte partielle Ableitung in Bezug auf x und z angibt, usw., und $h = I_x^2 + I_y^2 + I_z^2$.

[0030] In Schritt **103** werden Ringe um jedes Oberflächen-Voxel von Voxeln gleichen geodätischen Abstands vom Zentrum geformt, und die mittlere Krümmung (H) und die Gaußsche Krümmung (K) können für alle Oberflächen-Voxel innerhalb eines Ringes berechnet werden. Beispielsweise können ganze Zahlen als Abstandswerte zum Formen der Ringe verwendet werden: ein 1. (zentraler) Ring wird durch Voxel geformt, die in einem Abstand D von bis zu 1 mm ($D \leq 1$ mm) vom aktuellen zentralen Voxel liegen, der nächste Ring wird durch Voxel bei Abständen $1 \text{ mm} < D \leq 2$ mm geformt usw. Für eine höhere Genauigkeit können Ringe einer feineren Abstufung verwendet werden. [Abb. 3a](#) zeigt einen Dickdarmpolypen mit überlagerten Ringen auf der Oberfläche des Polypen. Sodann können in Schritt **104** innerhalb jedes Ringes die Standardabweichungen der Gaußschen Krümmung und der mittleren Krümmung berechnet werden. In Schritt **105** werden diejenigen Ringe ausgewählt, für die die Standardabweichung der Krümmung ein Minimum ist. Innerhalb dieser Gruppe von Ringen werden anschließend jene Ringe ausgewählt, bei denen die Krümmung einen Extremwert aufweist, d.h. entweder eine minimale Gaußsche Krümmung (K_{\min}) oder eine maximale mittlere Krümmung (H_{\max}) oder beide, um eine Gruppe von konzentrischen Ringen zu erhalten, deren Mittelpunkte ein Zentrum der interessierenden Struktur definiert.

[0031] Ausgehend von einer Gruppe von Ringen mit entweder einer minimalen Gaußschen Krümmung (K_{\min}) oder einer maximalen mittleren Krümmung (H_{\max}) können die Krümmungs-Steigungen in Schritt **107** berechnet werden zu:

$$S_K = (K_c - K_{\min})/D_{K_{\min}}$$

$$S_H = (H_c - H_{\max})/D_{H_{\max}}$$

wobei:

S_K die Steigung der Gaußschen Krümmung ist;

S_H die Steigung der mittleren Krümmung ist;

K_c die Gaußsche Krümmung im zentralen Ring ist;

K_{\min} die Krümmung des Ringes mit der minimalen Gaußschen Krümmung ist;

H_c die mittlere Krümmung im zentralen Ring ist;

H_{\max} die Krümmung des Ringes mit der maximalen mittleren Krümmung ist;

$D_{K_{\min}}$ der Abstand ist, der dem Ring mit der minimalen Gaußschen Krümmung entspricht; und

$D_{H_{\max}}$ der Abstand ist, der dem Ring mit der maximalen mittleren Krümmung entspricht.

[0032] [Abb. 3b](#) zeigt die radialen Richtungen einer Krümmungsberechnung zusammen mit dem Berech-

nungszentrum und dem negativen Krümmungs-Inflexionsgürtel. [Abb. 4](#) stellt einen Streuplot-Graphen von Krümmungspunkten zusammen mit Computerkrümmungssteigungen für S_K und S_H dar. Wenn sich ein zentraler Ring oben auf der Polypenstruktur befindet, entsprechen die Ringe mit einem Extremwert der Krümmung, z.B. eine minimale Gaußsche Krümmung und/oder eine maximale mittlere Krümmung, wahrscheinlich dem Inflexions-Gürtel der Gewebeveränderung. Die Wahrscheinlichkeit ist groß, dass Voxel mit negativen Steigungen der Gaußschen Krümmung und (oder) positiven Steigungen der mittleren Krümmung einem Polypen oder einer anderen Erhebung auf der Oberfläche entsprechen. Die Falten oder andere zylindrische Objekte könnten die gleichen Eigenschaften aufweisen, die Standardabweichungen der Krümmungen innerhalb der Ringe mit einer minimalen Gaußschen Krümmung und/oder einer maximalen mittleren Krümmung sind in den Falten jedoch deutlich höher als in den Polypen (oder anderen elliptischen Oberflächenpunkten). Unter dieser Annahme kann man in Schritt **108** alle Oberflächen-Voxel, bei denen $S_K \geq 0$ und/oder $S_H \leq 0$ ist, als zu einer flachen Oberfläche oder zu Vertiefungen und nicht zu Gewebeveränderungen zugehörig löschen. Des Weiteren kann man für die Größen von S_K und S_H Schwellenwerte einführen, um Gewebeveränderungen noch besser von anderen Oberflächenstrukturen unterscheiden zu können.

[0033] Für die verbleibenden Oberflächen-Voxel wird in Schritt **109** ein Clustering durchgeführt. Für jeden Cluster werden in Schritt **110** die Extremwerte der Krümmungs-Steigung, der minimale Wert von S_K und (oder) der maximale Wert von S_H , berechnet. Innerhalb eines interessierenden Teilvolumens werden anschließend in Schritt **111** die Cluster mit einem minimalen Wert von S_K oder einem maximalen Wert von S_H unter allen Clustern als die Cluster ausgewählt, die der interessierenden Gewebeveränderung entspricht. Die Oberfläche mit Gewebeveränderungen wird durch diejenigen Voxel dargestellt, die zu den gewinnenden (ausgewählten) Clustern gehören. Die zugrunde liegende Oberfläche, die das Volumen mit Gewebeveränderungen von dem Gewebe darunter trennt, wird dann in Schritt **112** durch Interpolation ermittelt. Die Voxel zwischen den durch die gewinnenden Cluster bestimmten Oberflächen und der interpolierten schneidenden Oberfläche werden als zu der Gewebeveränderung zugehörig betrachtet.

[0034] Ein bevorzugtes Verfahren wie das oben beschriebene kann ohne Einschränkungen auf die Erkennung von Gewebeveränderungen in Organen des Dickdarmtrakts, der Atemwege und anderen mit unterschiedlichen Bilderzeugungsarten wie z.B. CT, MR, US, PET usw. angewendet werden.

[0035] Es ist klar, dass die vorliegende Erfindung in vielfältigen Formen von Hardware, Software, Firmware, Sonderprozessen oder Kombinationen davon umgesetzt werden kann. Bei einer Ausführungsform kann die vorliegende Erfindung in Software als Anwendungsprogramm realisiert werden, das konkret in einer computerlesbaren Programmspeichereinheit vorhanden ist. Das Anwendungsprogramm kann in eine Maschine, die eine beliebige geeignete Architektur aufweist, hochgeladen und von ihr ausgeführt werden.

[0036] Nun Bezug nehmend auf [Abb. 5](#) kann gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung ein Computersystem **501** zur Umsetzung der vorliegenden Erfindung unter anderem eine Zentraleinheit (CPU) **502**, einen Speicher **503** und eine Eingangs/Ausgangs-Schnittstelle **504** umfassen. Das Computersystem **501** ist allgemein über die E/A-Schnittstelle **504** mit der Anzeigeeinheit **505** und verschiedenen Eingabeeinheiten **506** wie z.B. einer Maus und einer Tastatur verbunden. Zu den Unterstützungsschaltungen können Schaltungen wie ein Cache-Speicher, Stromversorgungen, Taktschaltungen und ein Datenübertragungsbus gehören. Der Speicher **503** kann einen Speicher mit wahlfreiem Zugriff (RAM), Nur-Lese-Speicher (ROM), ein Festplattenlaufwerk, ein Bandlaufwerk usw. oder Kombinationen davon beinhalten. Die vorliegende Erfindung kann als eine Routine **507** realisiert werden, die im Speicher **503** gespeichert und von der CPU **502** ausgeführt wird, um die Signale von der Signalquelle **508** zu verarbeiten. Als solches handelt es sich bei dem Computersystem **501** um ein Universal-Computersystem, das zu einem zweckgebundenen Computersystem wird, wenn es die Routine **507** der vorliegenden Erfindung ausführt.

[0037] Das Computersystem **501** enthält auch ein Betriebssystem und Mikrobefehlscode. Die verschiedenen hier beschriebenen Prozesse und Funktionen können entweder ein Teil des Mikrobefehlscodes oder ein Teil des Anwendungsprogramms (oder eine Kombination davon) sein, das über das Betriebssystem ausgeführt wird. Darüber hinaus können verschiedene andere Peripherie-Einheiten wie etwa eine zusätzliche Datenspeichereinheit und ein Drucker an die Computerplattform angeschlossen werden.

[0038] Da einige der Komponenten, aus denen das System besteht, sowie einige in den begleitenden Abbildungen gezeigten Verfahrensschritte in Software umgesetzt werden können, ist weiterhin klar, dass die tatsächlichen Verbindungen zwischen den Systemkomponenten (oder den Prozessschritten) in Abhängigkeit von der Art und Weise, wie die vorliegende Erfindung programmiert wird, unterschiedlich sein können. Im Hinblick auf die hier bereitgestellten Lehren der vorliegenden Erfindung ist der Fachmann in der Lage, diese und ähn-

liche Ausführungen oder Konfigurationen der vorliegenden Erfindung zu verwirklichen.

[0039] Die oben beschriebenen bestimmten Ausführungsformen dienen lediglich der Veranschaulichung, da die Erfindung modifiziert und auf unterschiedliche, aber äquivalente Art und Weise, die dem Fachmann geläufig ist, mit ihren Vorteilen und Lehren in die Praxis umgesetzt werden kann. Des Weiteren ist nicht beabsichtigt, dass Einzelheiten der hier gezeigten Konstruktion oder Ausführungsart außer die in den nachfolgenden Ansprüchen beschriebenen Einschränkungen darstellen. Es versteht sich daher von selbst, dass die bestimmten oben beschriebenen Ausführungsformen geändert oder modifiziert werden können und dass alle solche Veränderungen als im Umfang und Geist der Erfindung liegend betrachtet werden. Demzufolge wird der Schutz, wie er hier erwirkt werden soll, in den nachfolgenden Ansprüchen dargelegt.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Erkennen von Gewebeveränderungen und Polypen in einem digitalen Bild, wobei das Bild eine Vielzahl von 3D-Volumenpunkten umfasst, wobei das Verfahren die folgenden Schritte umfasst:

- a) eine dreidimensionale Oberfläche wird in dem besagten Bild identifiziert;
- b) ein erstes Krümmungsmass wird für jeden Punkt auf der identifizierten Oberfläche berechnet;
- c) für jeden Punkt auf der identifizierten Oberfläche wird eine Gruppe von Ringen, bestehend aus benachbarten Punkten auf der identifizierten Oberfläche, um jeden der besagten Punkte geformt, sodass jeder der besagten Punkte für jeden Ring seiner Gruppe von Ringen ein Mittelpunkt ist, wobei jeder Punkt eines Rings einen gleichen geodätischen Abstand vom Mittelpunkt für den Ring aufweist;
- d) eine Standardabweichung von dem jeweils zugehörigen ersten Krümmungsmass wird für jeden Ring berechnet;
- e) es werden diejenigen Ringe ausgewählt, die bezogen auf ihren jeweiligen Mittelpunkt die minimale Standardabweichung für das erste Krümmungsmass aufweisen;
- f) für diese ausgewählten Ringe wird eine erste Krümmungs-Steigung berechnet; und
- g) es werden jene Punkte von der identifizierten Oberfläche gelöscht, bei denen die erste Krümmungs-Steigung von den für einen Polypen oder eine Gewebeveränderung erwarteten Mustern abweicht.

2. Verfahren nach Anspruch 1, das ferner die folgenden Schritte umfasst:

Clustern der verbleibenden Punkte auf der besagten Oberfläche zur Bildung eines oder mehrerer Cluster; Berechnen für jeden Cluster eines Extremwerts der ersten Krümmungs-Steigung; Auswählen des Cluster mit dem größten Extremwert von allen Extremwerten der ersten Krümmungs-Steigung für jeden Cluster, und Kennzeichnen des gewählten Cluster als eine interessierende Gewebeveränderung; und Interpolieren einer zugrunde liegenden Oberfläche der interessierenden Gewebeveränderung, wobei die zugrunde liegende Oberfläche die Gewebeveränderung von dem Gewebe unterhalb der Gewebeveränderung trennt.

3. Verfahren nach Anspruch 2 wobei es sich bei dem ersten Krümmungsmaß um eine Gaußsche Krümmung handelt, die definiert ist als:

$$K = \frac{1}{h^2} \begin{bmatrix} I_x^2 (I_{yy} I_{zz} - I_{yz}^2) + 2I_y I_z (I_{xz} I_{xy} - I_{xx} I_{yz}) \\ + I_y^2 (I_{xx} I_{zz} - I_{yz}^2) + 2I_x I_z (I_{yz} I_{xy} - I_{yy} I_{xz}) \\ + I_z^2 (I_{xx} I_{yy} - I_{xy}^2) + 2I_x I_y (I_{xz} I_{yz} - I_{zz} I_{xy}) \end{bmatrix}$$

wobei I eine Intensität darstellt, die eine Funktion des Punktes auf der besagten Oberfläche mit den Koordinaten $(x, y, z) \in \mathbb{R}^3$ ist, ein einzelner Index bei I stellt eine partielle Ableitung von I in Bezug auf die im Index angegebene Koordinate dar, ein zweifacher Index bei I stellt eine gemischte partielle Ableitung in Bezug auf die durch die in den Indizes angegebenen Koordinaten dar, und $h = I_x^2 + I_y^2 + I_z^2$, und worin die Steigung der ersten Krümmung eine Gaußsche Krümmungs-Steigung ist, definiert durch

$$S_K = (K_c - K_{\min}) / D_{K_{\min}}$$

wobei

S_K die Steigung der Gaußschen Krümmung ist,

K_c die Gaußsche Krümmung in einem zentralen Ring ist,

K_{\min} die Krümmung des Ringes mit der minimalen Gaußschen Krümmung ist;

und

$D_{K_{\min}}$ der Abstand ist, der dem Ring mit der minimalen Gaußschen Krümmung entspricht, und

wobei die Gaußsche Krümmungs-Steigung für einen Polypen oder eine Gewebeveränderung kleiner als null ist, der Extremwert der Krümmungs-Steigung für einen gegebenen Cluster ein Minimum der Krümmungs-Steigung ist, und der größte Extremwert unter allen Extremwerten die kleinste Gaußsche Krümmungs-Steigung ist.

4. Verfahren nach Anspruch 2, wobei es sich bei dem ersten Krümmungsmaß um eine mittlere Krümmung handelt, die definiert ist als:

$$H = \frac{1}{2h^{3/2}} \begin{bmatrix} I_x^2(I_{yy} + I_{zz}) - 2I_y I_z I_{yz} \\ + I_y^2(I_{xx} + I_{zz}) - 2I_x I_z I_{xz} \\ + I_z^2(I_{xx} + I_{yy}) - 2I_x I_y I_{xy} \end{bmatrix}$$

wobei I eine Intensität darstellt, die eine Funktion des Punktes auf der besagten Oberfläche mit den Koordinaten $(x, y, z) \in \mathbb{R}^3$ ist, ein einzelner Index bei I stellt eine partielle Ableitung von I in Bezug auf die im Index angegebene Koordinate dar, ein zweifacher Index bei I stellt eine gemischte partielle Ableitung in Bezug auf die durch die in den Indizes angegebenen Koordinaten dar, und $h = I_x^2 + I_y^2 + I_z^2$, und worin die Steigung der ersten Krümmung die Steigung einer mittleren Krümmungs-Steigung ist, definiert durch

$$S_H = (H_c - H_{\max})/D_{K_{\max}}$$

wobei

S_H die Steigung der mittleren Krümmung ist;

H_c die mittlere Krümmung in einem zentralen Ring ist,

H_{\max} die Krümmung eines Ringes mit der maximalen mittleren Krümmung ist, und

$D_{K_{\max}}$ ein Abstand ist, der dem Ring mit der maximalen mittleren Krümmung entspricht, und

wobei die Steigung der mittleren Krümmung für einen Polypen oder eine Gewebeveränderung größer als null ist, der Extremwert der Krümmungs-Steigung für einen gegebenen Cluster eine maximale Krümmungs-Steigung ist, und der größte Extremwert von allen Extremwerten die größte Steigung der mittleren Krümmung ist.

5. Verfahren nach Anspruch 2, das ferner umfasst:

Berechnen eines zweiten Krümmungsmaßes für jeden Punkt auf der Oberfläche;

Berechnen einer Standardabweichung von dem zweiten Krümmungsmaß für jeden Punkt auf der Oberfläche;

Auswählen derjenigen Ringe, die bezogen auf ihren jeweiligen Mittelpunkt die minimale Standardabweichung für das zweite Krümmungsmaß aufweisen;

Berechnen einer zweiten Krümmungs-Steigung für die ausgewählten Ringe;

Löschen von denjenigen Punkten aus der Oberfläche, bei denen die erste Krümmungs-Steigung und die zweite Krümmungssteigung von dem für einen Polypen oder einer Gewebeveränderung erwarteten Muster abweicht;

Berechnen eines Extremwerts der zweiten Krümmungs-Steigung für jeden Cluster; und

Auswählen des Cluster mit dem größten Extremwert von allen Extremwerten der ersten Krümmungs-Steigung und mit dem größten Extremwert des Extremwertes der zweiten Krümmungs-Steigung, um den ausgewählten Cluster mit einer interessierenden Gewebeveränderung zu kennzeichnen.

6. Verfahren nach Anspruch 5 wobei es sich bei dem ersten Krümmungsmaß um eine Gaußsche Krümmung handelt, die definiert ist als:

$$K = \frac{1}{h^2} \begin{bmatrix} I_x^2(I_{yy}I_{zz} - I_{yz}^2) + 2I_y I_z (I_{xz}I_{xy} - I_{xx}I_{yz}) \\ + I_y^2(I_{xx}I_{zz} - I_{yz}^2) + 2I_x I_z (I_{yz}I_{xy} - I_{yy}I_{xz}) \\ + I_z^2(I_{xx}I_{yy} - I_{xy}^2) + 2I_x I_y (I_{xz}I_{yz} - I_{zz}I_{xy}) \end{bmatrix}$$

wobei I eine Intensität darstellt, die eine Funktion des Punktes auf der besagten Oberfläche mit den Koordinaten $(x, y, z) \in \mathbb{R}^3$ ist, ein einzelner Index bei I stellt eine partielle Ableitung von I in Bezug auf die im Index angegebene Koordinate dar, ein zweifacher Index bei I stellt eine gemischte partielle Ableitung in Bezug auf die durch die in den Indizes angegebenen Koordinaten dar, und $h = I_x^2 + I_y^2 + I_z^2$, und

wobei die Steigung der ersten Krümmung eine Gaußsche Krümmungs-Steigung ist, definiert durch

$$S_K = (K_c - K_{\min})/D_{K_{\min}}$$

wobei

S_K die Gaußsche Krümmungs-Steigung ist,

K_c die Gaußsche Krümmung in einem zentralen Ring ist,

K_{\min} die Krümmung eines Ringes mit einer minimalen Gaußschen Krümmung ist,

und

$D_{K_{\min}}$ der Abstand ist, der dem Ring mit der minimalen Gaußschen Krümmung entspricht, und

wobei die Gaußsche Krümmungs-Steigung für einen Polypen oder eine Gewebeveränderung kleiner als null ist, der Extremwert der Krümmungs-Steigung für einen gegebenen Cluster ein Minimum ist, und der größte Extremwert unter allen Extremwerten die kleinste Gaußsche Krümmungs-Steigung ist.

7. Verfahren nach Anspruch 5, wobei es sich bei dem zweiten Krümmungsmaß um eine mittlere Krümmung handelt, die definiert ist als:

$$H = \frac{1}{2h^{3/2}} \begin{bmatrix} I_x^2(I_{yy} + I_{zz}) - 2I_y I_z I_{yz} \\ + I_y^2(I_{xx} + I_{zz}) - 2I_x I_z I_{xz} \\ + I_z^2(I_{xx} + I_{yy}) - 2I_x I_y I_{xy} \end{bmatrix}$$

wobei I eine Intensität darstellt, die eine Funktion des Punktes auf der besagten Oberfläche mit den Koordinaten $(x, y, z) \in \mathbb{R}^3$ ist, ein einzelner Index bei I stellt eine partielle Ableitung von I in Bezug auf die im Index angegebene Koordinate dar, ein zweifacher Index bei I stellt eine gemischte partielle Ableitung in Bezug auf die durch die in den Indizes angegebenen Koordinaten dar, und $h = I_x^2 + I_y^2 + I_z^2$, und

worin die Steigung der zweiten Krümmung die Steigung einer mittleren Krümmung ist, definiert durch

$$S_H = (H_c - H_{\max})/D_{K_{\max}}$$

wobei

S_H die Steigung der mittleren Krümmung ist,

H_c die mittlere Krümmung in einem zentralen Ring ist,

H_{\max} die Krümmung eines Ringes mit der maximalen mittleren Krümmung ist, und

$D_{K_{\max}}$ ein Abstand ist, der dem Ring mit der maximalen mittleren Krümmung entspricht, und

wobei die Steigung der mittleren Krümmung für einen Polypen oder eine Gewebeveränderung größer als null ist, der Extremwert der Krümmungs-Steigung für einen gegebenen Cluster ein Maximum ist, und der größte Extremwert unter allen Extremwerten die größte Steigung der mittleren Krümmung ist.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7,

dadurch gekennzeichnet, dass

für jeden Punkt auf der identifizierten Oberfläche eine Gaußsche Krümmung und eine mittlere Krümmung berechnet wird;

für jeden Ring eine Standardabweichung der Gaußschen Krümmung und einer Standardabweichung der mittleren Krümmung berechnet wird;

Auswählen der Ringe, die bezogen auf ihren jeweiligen Mittelpunkt die minimalen Standardabweichung für die Gaußsche Krümmung und die mittlere Krümmung aufweisen;

Berechnen der Steigung einer Gaußschen Krümmung und der Steigung einer mittleren Krümmung für die ausgewählten Ringe; und

Löschen derjenigen Punkte von der Oberfläche, bei denen die Steigung der Gaußschen Krümmung größer oder gleich null ist oder bei denen die Steigung der mittleren Krümmung kleiner oder gleich null ist.

9. Verfahren nach Anspruch 8, das ferner die folgenden Schritte umfasst:

Clustern der verbleibenden Punkte auf der besagten Oberfläche, um ein oder mehrere Cluster zu bilden;

Berechnen eines Steigungsminimums der Gaußschen Krümmung und eines Steigungsmaximums der mittleren Krümmung für jeden Cluster;

Auswählen des Cluster mit der kleinsten Steigung der Gaußschen Krümmung und der größten Steigung der mittleren Krümmung, und Kennzeichnen der ausgewählten Cluster als eine interessierende Gewebeveränderung; und

Interpolieren einer zugrunde liegenden Oberfläche der interessierenden Gewebeveränderung, wobei die besagte zugrunde liegende Oberfläche die besagte Gewebeveränderung von dem Gewebe unterhalb der Gewebeveränderung trennt.

10. Verfahren nach Anspruch 9, wobei die Gaußsche Krümmung definiert ist als

$$K = \frac{1}{h^2} \left[\begin{aligned} &I_x^2 (I_{yy} I_{zz} - I_{yz}^2) + 2I_y I_z (I_{xz} I_{xy} - I_{xx} I_{yz}) \\ &+ I_y^2 (I_{xx} I_{zz} - I_{yz}^2) + 2I_x I_z (I_{yz} I_{xy} - I_{yy} I_{xz}) \\ &+ I_z^2 (I_{xx} I_{yy} - I_{xy}^2) + 2I_x I_y (I_{xz} I_{yz} - I_{zz} I_{xy}) \end{aligned} \right]$$

wobei I eine Intensität darstellt, die eine Funktion des Punktes auf der besagten Oberfläche mit den Koordinaten $(x, y, z) \in \mathbb{R}^3$ ist, ein einzelner Index bei I stellt eine partielle Ableitung von I in Bezug auf die im Index angegebene Koordinate dar, ein zweifacher Index bei I stellt eine gemischte partielle Ableitung in Bezug auf die durch die in den Indizes angegebenen Koordinaten dar, und $h = \sqrt{I_x^2 + I_y^2 + I_z^2}$, wobei die Steigung der Gaußschen Krümmung definiert ist als

$$S_K = (K_c - K_{\min})/D_{K\min}$$

wobei

S_K die Gaußsche Krümmungs-Steigung ist,

K_c die Gaußsche Krümmung in einem zentralen Ring ist,

K_{\min} die Krümmung eines Ringes mit einer minimalen Gaußschen Krümmung ist,

und

$D_{K\min}$ der Abstand ist, der dem Ring mit der minimalen Gaußschen Krümmung entspricht.

11. Verfahren nach Anspruch 9, wobei die mittlere Krümmung definiert ist als

$$H = \frac{1}{2h^{3/2}} \left[\begin{aligned} &I_x^2 (I_{yy} + I_{zz}) - 2I_y I_z I_{yz} \\ &+ I_y^2 (I_{xx} + I_{zz}) - 2I_x I_y I_{xz} \\ &+ I_z^2 (I_{xx} + I_{yy}) - 2I_x I_y I_{xy} \end{aligned} \right]$$

wobei I eine Intensität darstellt, die eine Funktion des Punktes auf der besagten Oberfläche mit den Koordinaten $(x, y, z) \in \mathbb{R}^3$ ist, ein einzelner Index bei I stellt eine partielle Ableitung von I in Bezug auf die im Index angegebene Koordinate dar, ein zweifacher Index bei I stellt eine gemischte partielle Ableitung in Bezug auf die durch die in den Indizes angegebenen Koordinaten dar, und $h = \sqrt{I_x^2 + I_y^2 + I_z^2}$, wobei die Steigung der mittleren Krümmung definiert ist als

$$S_H = (H_c - H_{\max})/D_{H\max}$$

wobei

S_H die Steigung der mittleren Krümmung ist,

H_c die mittlere Krümmung in einem zentralen Ring ist,

H_{\max} die Krümmung eines Ringes mit einer maximalen mittleren Krümmung ist,

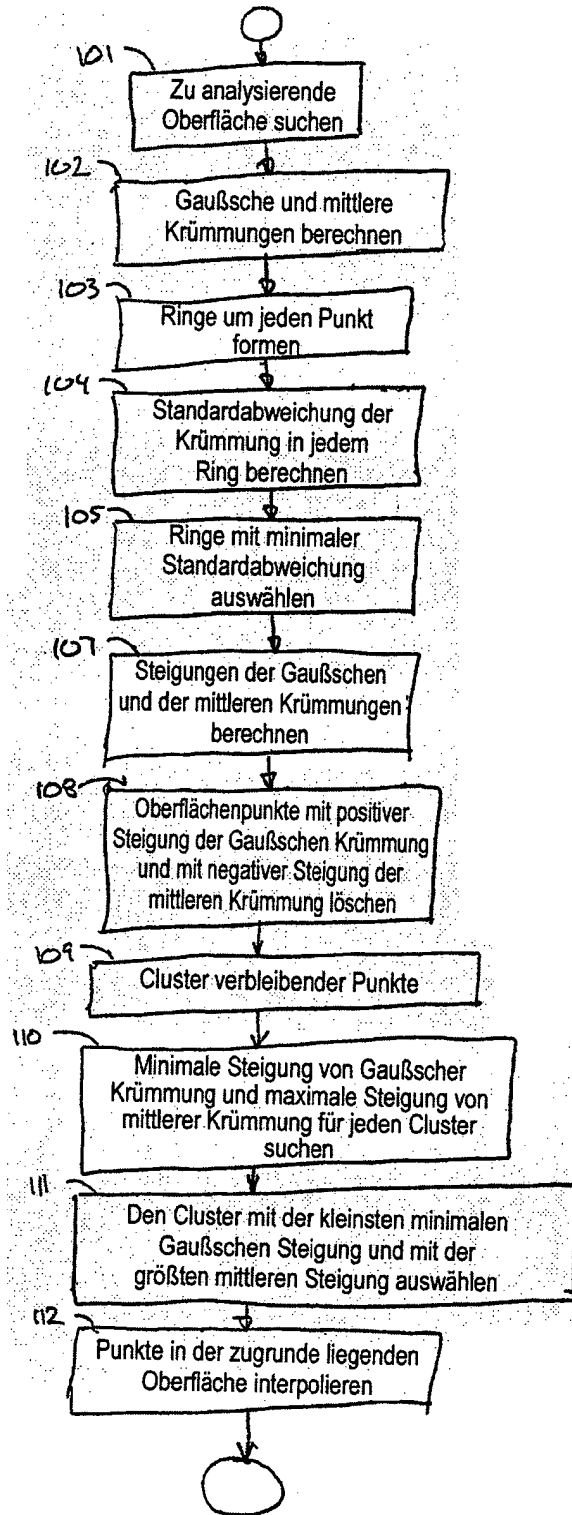
und

$D_{H\max}$ der Abstand ist, der dem Ring mit der maximalen mittleren Krümmung entspricht.

Es folgen 5 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

Abb. 1



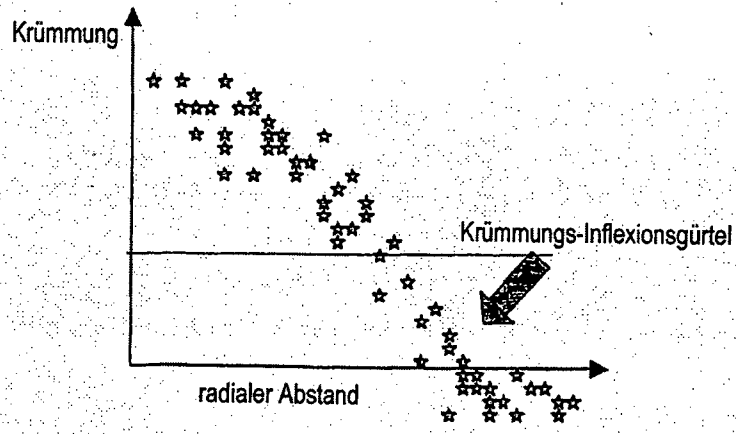


Abb. 2 Ein Streudiagramm der Krümmungsverteilung

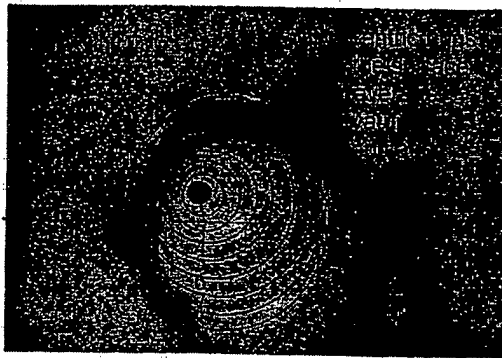
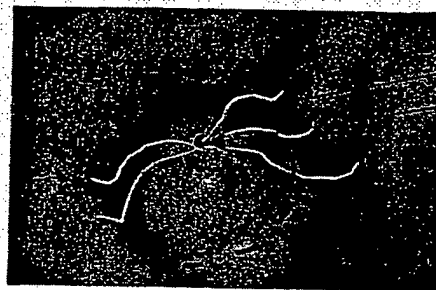
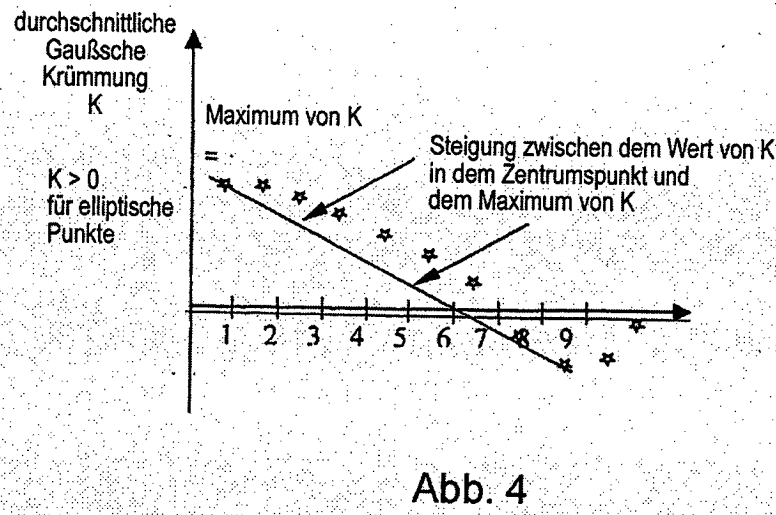


Abb. 3a



radiale Richtungen
der Krümmungsberechnung
Zentrum für Berechnung
negativer Krümmungsgürtel

Abb. 3b



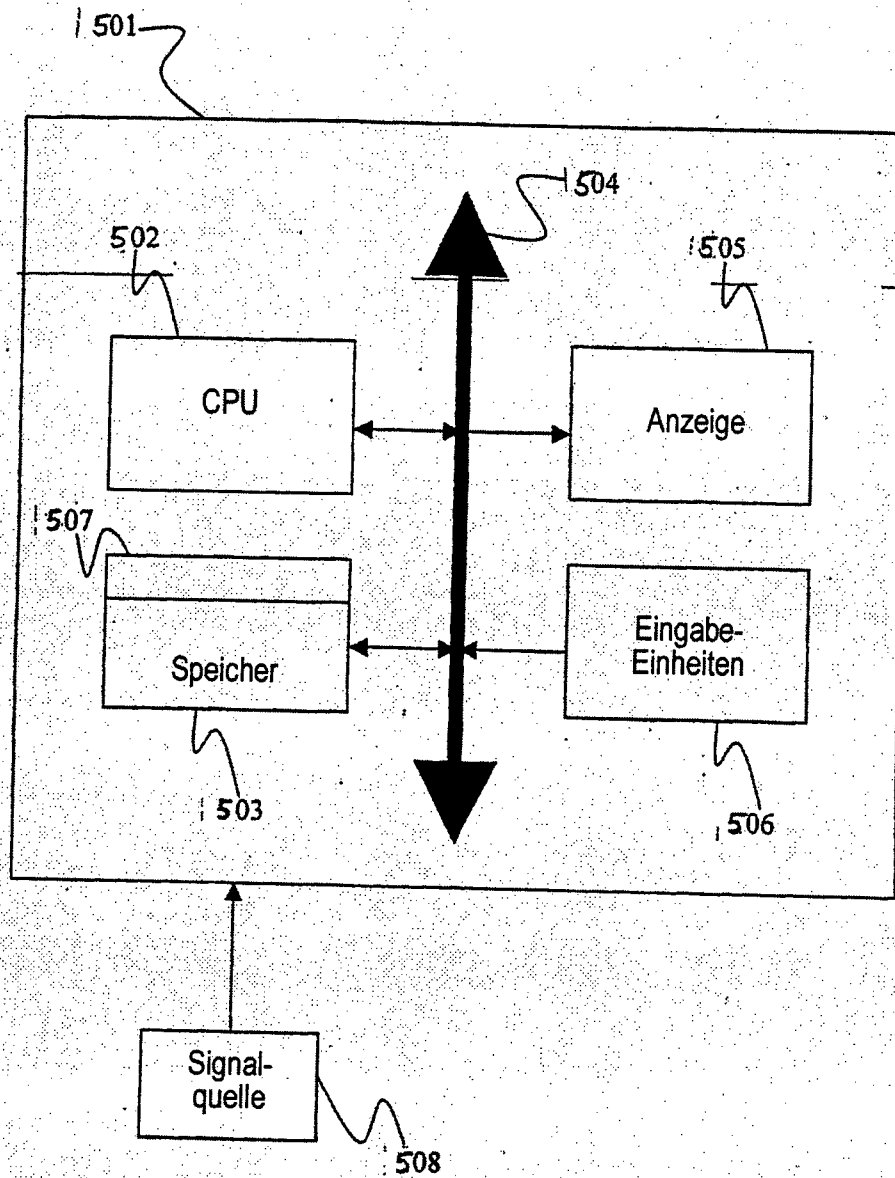


Abb. 5