(19) Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2011 003 242 B4** 2013.01.17

(12) # Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2011 003 242.8**
(22) Anmeldetag: **27.01.2011**
(43) Offenlegungstag: **02.08.2012**
(45) Veröffentlichungstag der Patenterteilung: **17.01.2013**

(51) Int Cl.: ***G06T 11/00*** (2006.01)
G06T 3/40 (2006.01)
G06T 5/30 (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. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:
Universität Bremen, 28359, Bremen, DE

(74) Vertreter:
Fink Numrich Patentanwälte, 80634, München, DE

(72) Erfinder:
Trede, Dennis, 28213, Bremen, DE; Maaß, Peter, 28211, Bremen, DE; Alexandrov, Theodore, 28209, Bremen, DE

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

WO 2009/ 128 042 A1

GONZALEZ, R. C. [et al.:] Digital Image Processing. Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey, Second Edition, 2002, S. 52-56 und 519-532.

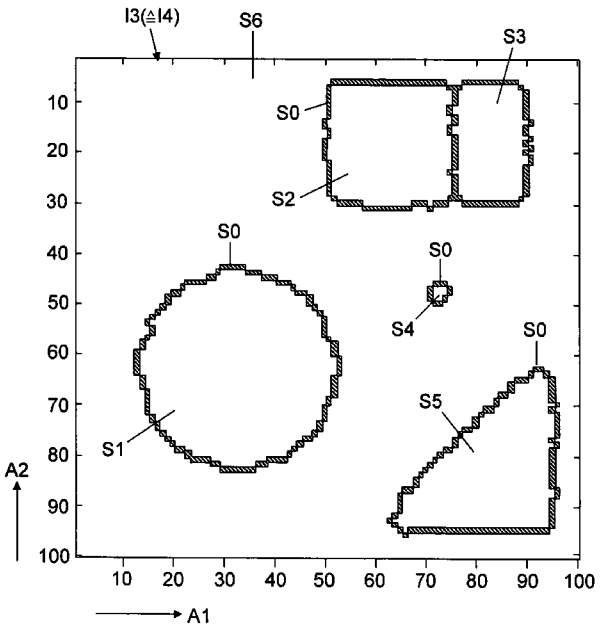
HAN, X. [et al.]: A Moving Grid Framework for Geometric Deformable Models. Technical Report, John Hopkins University, November 2006.

HAN, X. [et al.]: A Topology Preserving Level Set Method for Geometric Deformable Models, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 25, Juni 2003, S. 755-768.

MARION-POTY, V. [et al.]: A new 2-D and 3-D thinning algorithm based on successive border generations. Research Report, Ecole Normale Superieure de Lyon, Juli 1994.

(54) Bezeichnung: **Verfahren und Vorrichtung zur rechnergestützten Verarbeitung eines digitalisierten Bildes sowie maschinenlesbarer Datenträger**

(57) Hauptanspruch: Verfahren zur rechnergestützten Verarbeitung eines digitalisierten Bildes (I), wobei das Bild eine Segmentierungskarte umfassend eine Mehrzahl von klassifizierten Pixelbereichen (S1, S2 ..., S6) aus aneinander angrenzenden Pixeln ist, wobei alle Pixel eines jeweiligen klassifizierten Pixelbereichs (S1, S2, ..., S6) der Segmentierungskarte den gleichen Pixelwert aufweisen, der einer jeweiligen Klasse aus einer Mehrzahl von Klassen zugeordnet ist, wobei jede Klasse durch einen anderen Pixelwert repräsentiert wird, wobei das digitalisierte Bild (I) in ein räumlich höher aufgelöstes Bild (I3, I5) gewandelt wird und im Rahmen der Wandlung folgende Schritte durchgeführt werden:
a) aus dem digitalisierten Bild (I) wird ein erstes Bild (I1) in einer höheren räumlichen Auflösung als das digitalisierte Bild (I) erzeugt, indem jedes Pixel des digitalisierten Bildes (I) in ein Pixelfeld aus mehreren Pixeln transformiert wird, welche der Klasse des jeweiligen, der Transformation unterzogenen Pixels zugeordnet sind;
b) die klassifizierten Pixelbereiche (S1, S2, ..., S6) des ersten Bildes...



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur rechnergestützten Verarbeitung eines digitalisierten Bildes sowie eine entsprechende Vorrichtung und einen entsprechenden maschinenlesbaren Datenträger.

[0002] Die Erfindung liegt allgemein auf dem Gebiet der digitalen Bildverarbeitung. Im Besonderen betrifft die Erfindung die Verarbeitung von digitalisierten Bildern, deren einzelne Pixel klassifiziert sind, wodurch die digitalisierten Bilder in verschiedene Pixelbereiche segmentiert werden. Die Segmentierung ist ein Teilgebiet der Bildverarbeitung und hat das Ziel, in einem digitalisierten Bild interessierende Objekte von übrigen Bildteilen zu trennen. Das Ergebnis der Segmentierung ist dabei ein digitalisiertes Bild in der Form einer Segmentierungskarte, in der jedem Pixel eine Klasse aus einer Mehrzahl von Klassen zugeordnet ist.

[0003] Es gibt Anwendungen, in denen die ursprüngliche Auflösung eines segmentierten Bildes nicht ausreichend ist, z. B. in Fällen, in denen das segmentierte Bild mit weiteren, höher aufgelösten Daten co-registriert werden soll oder feinere Muster auf der Segmentierungskarte erkannt werden sollen. Bei der Vergrößerung von segmentierten Bildern ist darauf zu achten, dass keinerlei topologische Veränderungen dahingehend auftreten dürfen, dass zusammenhängende Segmente in Teilsegmente aufgeteilt werden bzw. getrennte Segmente miteinander zusammenwachsen. Herkömmliche Verfahren zur Erhöhung der Auflösung von natürlichen Bildern sind für segmentierte digitalisierte Bilder nicht anwendbar, da mit diesen Verfahren nicht die Topologieerhaltung der einzelnen Bildsegmente gewährleistet ist.

[0004] Die Druckschriften [13] und [15] beschreiben verschiedene morphologische Operationen, welche auf diskretisierte digitalisierte Bilder angewendet werden.

[0005] In der Druckschrift [14] wird eine Topologie-erhaltende Methode zur Konturveränderung basierend auf „Geometric Deformable Models" beschrieben, welche auf digitalisierte Grauwert-Bilder angewendet wird.

[0006] In der Druckschrift [16] ist ein Bildverarbeitungsalgorithmus zur automatischen und genauen Segmentierung eines abdominalen Aortenaneurysmas offenbart.

[0007] Aufgabe der Erfindung ist es deshalb, ein Verfahren zur Verarbeitung eines segmentierten digitalisierten Bildes zu schaffen, welches das digitalisierte Bild in ein qualitativ hochwertiges, räumlich höher aufgelöstes Bild wandelt und dabei die Topologie der segmentierten Bildbereiche erhält.

[0008] Diese Aufgabe wird durch das Verfahren gemäß Patentanspruch 1 bzw. die Vorrichtung gemäß Patentanspruch 16 bzw. den Datenträger gemäß Patentanspruch 17 gelöst. Weiterbildungen der Erfindung sind in den abhängigen Ansprüchen definiert.

[0009] In dem erfindungsgemäßen Verfahren wird ein digitalisiertes Bild verarbeitet, wobei das Bild eine Segmentierungskarte umfassend eine Mehrzahl von klassifizierten Pixelbereichen aus aneinander angrenzenden Pixeln ist, wobei alle Pixel eines jeweiligen klassifizierten Pixelbereichs der Segmentierungskarte den gleichen Pixelwert aufweisen, der einer jeweiligen Klasse aus einer Mehrzahl von Klassen zugeordnet ist, wobei jede Klasse durch einen anderen Pixelwert repräsentiert wird. Erfindungsgemäß wird das digitalisierte Bild in ein räumlich höher aufgelöstes Bild gewandelt, wobei im Rahmen der Wandlung die nachfolgenden Schritte a) bis c) durchgeführt werden.

[0010] In einem Schritt a) wird aus dem digitalisierten Bild ein erstes Bild mit einer höheren räumlichen Auflösung als das digitalisierte Bild erzeugt. Dies wird dadurch erreicht, dass jedes Pixel des digitalisierten Bildes in ein Pixelfeld aus mehreren Pixeln transformiert wird, welche der Klasse des jeweiligen, der Transformation unterzogenen Pixels zugeordnet sind. Hierdurch wird in einfacher Weise eine Vergrößerung der Auflösung des ursprünglichen digitalisierten Bildes erreicht.

[0011] In einem Schritt b) wird dann das erste Bild einer morphologischen Erosion mit einer Strukturmaske unterzogen, so dass die Topologie der klassifizierten Pixelbereiche erhalten bleibt, wobei Pixel, welche aufgrund der morphologischen Erosion keiner Klasse der Mehrzahl von Klassen mehr zugeordnet sind, einer neuen Klasse zugeordnet werden. Auf diese Weise wird ein zweites Bild geschaffen, welches ein oder mehrere erodierte Pixelbereiche enthält, wobei alle Pixel eines jeweiligen erodierten Pixelbereichs der neuen Klasse zugeordnet sind. Verfahren zur morphologischen Erosion sind an sich aus dem Stand der Technik bekannt. Dabei wandert die Strukturmaske über den gerade betrachteten Pixelbereich, wobei das aktuelle Pixel, auf dem sich die Strukturmaske befindet, der neuen Klasse zugewiesen wird, sofern zumindest ein Pixel innerhalb

der Strukturmaske nicht zum aktuell betrachteten Pixelbereich gehört. Durch geeignete Festlegung der Strukturmaske kann in an sich bekannter Weise sichergestellt werden, dass keine isolierten Pixelbereiche erzeugt werden, welche die Topologie verändern.

[0012] Im Rahmen eines Schritts c) des erfindungsgemäßen Verfahrens wird das in Schritt b) erhaltene zweite Bild basierend auf einer Topologie-erhaltenden Methode zur Konturveränderung weiterverarbeitet. Methoden zur Konturveränderung, mit denen innerhalb eines digitalisierten Bildes die Kontur eines Objekts vergrößert bzw. aufgeblasen wird, sind an sich aus dem Stand der Technik bekannt. Diese Methoden sind dem Fachmann auch unter dem Begriff „aktive Konturen" bzw. „Snakes" bzw. „Geometrie Deformable Models" geläufig. Erfindungsgemäß wird dabei eine spezielle Methode der Konturveränderung verwendet, welche die Erhaltung der Topologie der entsprechenden segmentierten Pixelbereiche gewährleistet. Mit dieser Methode werden die an die jeweiligen erodierten Pixelbereiche angrenzenden Konturen der klassifzierten Pixelbereiche des zweiten Bildes vergrößert und geglättet.

[0013] Im Rahmen der Durchführung des Schritts c) werden ferner die bei der Vergrößerung der Konturen zu den klassifizierten Pixelbereichen hinzukommenden Pixel den entsprechenden Klassen der jeweiligen klassifizierten Pixelbereiche zugeordnet, wodurch schließlich ein drittes segmentiertes Bild erhalten wird. Dieses Bild weist eine höhere Auflösung als das ursprüngliche digitalisierte Bild auf, wobei ferner sichergestellt ist, dass die Topologie der segmentierten Pixelbereiche erhalten bleibt und die Konturen der Pixelbereiche geglättet sind. In einer Variante der Erfindung ist dieses dritte Bild das Ergebnisbild des erfindungsgemäßen Verfahrens.

[0014] In einer bevorzugten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens werden in Schritt a) die jeweiligen Pixel des digitalisierten Bildes in (n×n)-Pixelquadrate transformiert, wobei n eine ungerade Zahl ist und die Strukturmaske bei der Durchführung der morphologischen Erosion ein (m×m)-Pixelquadrat ist, wobei in eine ungerade Zahl kleiner oder gleich n ist. Bei einer derartigen Wahl der Strukturmaske ist sichergestellt, dass die Topologie im ursprünglichen digitalisierten Bild auch in dem aus der morphologischen Erosion hervorgehenden zweiten Bild erhalten bleibt.

[0015] In einer besonders bevorzugten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens wird das dritte Bild bzw. ein viertes Bild, welches aus einer Nachverarbeitung des dritten Bilds hervorgeht, nochmals einem Schritt der morphologischen Dilatation unterzogen. Die Strukturmaske der morphologischen Dilatation ist dabei derart festgelegt, dass die Pixel in den erodierten Pixelbereichen in Pixel der übrigen klassifizierten Pixelbereiche gewandelt werden, wobei die gewandelten Pixel wiederum der entsprechenden Klasse des jeweiligen klassifizierten Pixelbereichs zugeordnet werden. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass die noch im dritten Bildvorhandenen erodierten Pixelbereiche vollständig entfernt werden. Die Operation der morphologischen Dilatation ist dabei an sich aus dem Stand der Technik bekannt. Dabei wandert die Strukturmaske über das Bild, wobei das aktuelle Pixel, auf dem sich die Strukturmaske befindet, dann dem gerade betrachteten Pixelbereich zugeordnet wird, wenn zumindest ein Pixel innerhalb der Strukturmaske zum betrachteten Pixelbereich gehört.

[0016] In einer speziellen Ausführungsform des soeben beschriebenen Verfahrens wird das dritte Bild derart nachbearbeitet, dass jedes Pixel des dritten Bilds in ein Pixelfeld aus mehreren Pixeln transformiert wird, welche der Klasse des jeweiligen, der Transformation unterzogenen Pixels zugeordnet sind, wodurch das vierte Bild in einer höheren Auflösung als das dritte Bild erhalten wird. Um eine gleichmäßige Aufteilung eines erodierten Pixelbereichs an die daran angrenzenden klassifizierten Pixelbereiche zu erreichen, werden in einer bevorzugten Ausführungsform die jeweiligen Pixel des vierten Bildes in (1×1)-Pixelquadrate transformiert, wobei 1 eine gerade Zahl ist, wobei die Strukturmaske bei der Durchführung der morphologischen Dilatation ein (1 + 1)×(1 + 1)-Pixelquadrat ist. Ein bevorzugter Wert von 1 ist dabei der Wert 2.

[0017] Wie bereits oben erwähnt, wird der Schritt c) des erfindungsgemäßen Verfahrens basierend auf einer Topologie-erhaltenden Methode zur Konturveränderung durchgeführt, wobei hierzu an sich bekannte Methoden verwendet werden können. In einer besonders bevorzugten Ausführungsform wird dabei eine Methode eingesetzt, bei der eine Kante zwischen einem klassifizierten Pixelbereich und einem erodierten Pixelbereich im zweiten Bild über den Null-Level einer Level-Set-Funktion definiert ist. Diese Level-Set-Funktion weist somit Pixeln im erodierten Pixelbereich ein anderes Vorzeichen als Pixeln in einem klassifizierten Pixelbereich zu. In einer bevorzugten Variante wird eine Level-Set-Funktion verwendet, welche umso größer wird, je weiter ein Pixel von der Kante entfernt ist. Insbesondere wird dabei als Level-Set-Funktion der euklidische Abstand des Pixels zur Kante bzw. eine davon abhängige Größe verwendet.

[0018] In einer besonders bevorzugten Ausführungsform beruht die Topologie-erhaltende Methode zur Konturveränderung auf der Integration einer partiellen Differentialgleichung, wobei eine solche Methode an sich bekannt ist. In einer bevorzugten Variante lautet dabei die partielle Differentialgleichung wie folgt:

$$\partial_t u = \left(div\left(\frac{\nabla u}{\|\nabla u\|} \right) + \rho \right) \|\nabla u\|,$$

wobei ∇ der räumliche Gradient der Level-Set-Funktion für das zweite Bild ist und der Parameter $\rho > 0$ ein Aufblasfaktor ist, der den Transport in Richtung des Gradienten ∇u beschreibt.

[0019] Die partielle Differentialgleichung kann dabei mit an sich bekannten Verfahren gelöst werden. Insbesondere werden hierzu eine Narrow-Band-Methode (z. B. aus Druckschrift [1] bekannt) und/oder additives Operator-Splitting (z. B. aus Druckschrift [8] bekannt) eingesetzt. Diese Methoden gewährleisten eine recheneffiziente Lösung der partiellen Differentialgleichung.

[0020] Das erfindungsgemäße Verfahren kann in beliebigen technischen Anwendungsgebieten eingesetzt werden, in denen digitalisierte Bilder mit klassifizierten Pixelbereichen auftreten. Beispielsweise kann mit dem erfindungsgemäßen Verfahren ein digitalisiertes Bild verarbeitet werden, welches über bildgebende Massenspektroskopie ermittelt ist. Ebenso kann das erfindungsgemäß verarbeitete Bild mit einem oder mehren solcher Bilder kombiniert werden. Unter Kombinieren wird hier und im Folgenden insbesondere die Überlagerung des erfindungsgemäß verarbeiteten digitalisierten Bildes mit anderen Bildern gleicher Auflösung verstanden. Ein anderer Anwendungsbereich der Erfindung sind digitalisierte Bilder in der Form von Fernerkundungsaufnahmen, welche z. B. mit Multispektral- und/oder Hyperspektralinstrumenten aufgenommen sind und Ausschnitte der Erdoberfläche zeigen. Das erfindungsgemäß verarbeitete digitalisierte Bild kann eine solche Fernerkundungsaufnahme sein. Ebenso besteht die Möglichkeit, das erfindungsgemäß verarbeitete Bild mit einem oder mehreren solcher Fernerkundungsaufnahmen zu kombinieren.

[0021] Ein weiterer Anwendungsbereich des Verfahrens sind digitalisierte Bilder, welche mit medizinischen Bildgebungsvorrichtungen, insbesondere Computertomographen und/oder Magnetresonanztomographen, aufgenommen sind. Das erfindungsgemäß verarbeitete digitalisierte Bild kann dabei ein solches, mit einer medizinischen Bildgebungsvorrichtung aufgenommenes Bild sein. Ebenso besteht die Möglichkeit, dass das erfindungsgemäß verarbeitete Bild mit einem oder mehreren solcher Bilder kombiniert wird.

[0022] In einer weiteren Ausführungsform werden mit dem erfindungsgemäßen Verfahren Bilder verarbeitet, welche mittels Terahertz-Strahlung aufgenommen sind. Ebenso können die erfindungsgemäß verarbeiteten Bilder in geeigneter Weise mit einem oder mehreren, mittels Terahertz-Strahlung aufgenommenen Bildern kombiniert werden.

[0023] Da das mit dem erfindungsgemäßen Verfahren erhaltene Bild glatte Konturen aufweist, kann in einer weiteren Ausführungsform das verarbeitete Bild auch einer Mustererkennung unterzogen werden, wobei Verfahren zur Mustererkennung an sich aus dem Stand der Technik bekannt sind.

[0024] Neben dem oben beschriebenen erfindungsgemäßen Verfahren betrifft die Erfindung ferner eine Vorrichtung zur rechnergestützten Verarbeitung eines digitalisierten Bildes, wobei in der Vorrichtung eine Verarbeitungseinheit vorgesehen ist, welche erste bis dritte Mittel zur Durchführung der entsprechenden Verfahrensschritte a) bis c) aufweist. Die Verarbeitungseinheit bzw. die ersten bis dritten Mittel sind dabei in der Form von Software und/oder Hardware realisiert. Vorzugsweise ist die Vorrichtung dabei derart ausgestaltet, dass eine oder mehrere der oben beschriebenen bevorzugten Varianten des erfindungsgemäßen Verfahrens mit der Vorrichtung durchführbar sind.

[0025] Die Erfindung betrifft darüber hinaus einen maschinenlesbarer Datenträger mit einem darauf gespeicherten Programmcode zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 15, wenn der Programmcode durch einen Rechner ausgeführt wird.

[0026] Ausführungsbeispiele der Erfindung werden nachfolgend anhand der beigefügten Figuren detailliert beschrieben.

[0027] Es zeigen:

[0028] Fig. 1 bis Fig. 4 schematische Darstellungen von digitalisierten Bildern, anhand derer die Durchführung der Schritte einer Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens erläutert werden;

[0029] Fig. 5 und Fig. 6 dreidimensionale schematische Darstellungen, welche die Vergrößerung von Konturen anhand des Bildes der Fig. 3 bzw. Fig. 4 basierend auf einer Topologie-erhaltenden Level-Set-Methode verdeutlichen.

[0030] Nachfolgend wird eine Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahren beispielhaft anhand der Verarbeitung des in Fig. 1 gezeigten digitalisierten Bildes 1 erläutert: Das Bild stellt ein Pixelquadrat aus 20×20 Pixeln dar, wobei die horizontale Erstreckungsrichtung der Pixel durch die Achse A1 und die vertikale Erstreckungsrichtung der. Pixel durch die Achse A2 angedeutet ist. Der Hintergrund des Quadrats ist dabei mit S6 bezeichnet ist und im Vordergrund sind die Strukturen S1, S2, S3, S4 und S5 wiedergegeben. Das Bild stellt eine im Rahmen des erfindungsgemäßen Verfahrens zu verarbeitende Segmentierungskarte dar, wobei die einzelnen Pixelbereiche bzw. Segmente S1, S2, ..., S6 unterschiedlichen Klassen zugeordnet sind, welche in der hier beschriebenen Ausführungsform durch ganze Zahlen 1, 2, ..., 6 bezeichnet sind. Insbesondere wird dabei das entsprechende Segment Si (i = 1, ..., 6) der Klasse i zugeordnet. Im Bild der Fig. 1 werden die Klassen durch unterschiedliche Farben der Segmente wiedergegeben, wobei diese Farben aufgrund der Schwarzweiß-Darstellung der Fig. 1 nicht ersichtlich sind. Insbesondere ist das Segment S1 ein grünes Segment, das Segment S2 ein hellblaues Segment, das Segment S3 ein rotes Segment, das Segment S4 ein gelbes Segment und das Segment S5 ein dunkelblaues Segment. Ferner hat das den Hintergrund bildende Segment S6 die Farbe schwarz.

[0031] Das digitalisierte Bild der Fig. 1 ist lediglich ein Beispiel eines Bildes, anhand dessen eine Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens erläutert wird. Das Verfahren kann für beliebige Segmentierungskarten aus einer Vielzahl von technischen Gebieten eingesetzt werden, wobei die Segmentierungskarten auch drei oder mehr Dimensionen aufweisen können. Ein Anwendungsbereich ist z. B. die bereits oben erwähnte bildgebende Massenspektroskopie, die auch als IMS (IMS = Imaging Mass Spectrometry) bezeichnet wird. Dabei kann z. B. die Struktur von menschlichem oder tierischem Gewebe massenspektroskopisch untersucht werden, indem ein Massenspektrum für jeden räumlichen Punkt im Gewebe ermittelt wird. Das Massenspektrum ist dabei eine hochdimensionale Beobachtung der Häufigkeitsverteilung von an den entsprechenden räumlichen Punkten generierten ionisierten Molekülen. Es enthält die Information über die gesamte molekulare Zusammensetzung an jedem gemessenen räumlichen Punkt. Ein IMS-Datensatz stellt somit einen dreidimensionalen Datenwürfel mit räumlichen Koordinaten dar, wobei jeder Koordinate aufgrund der molekularen Zusammensetzung einer entsprechenden Klasse zugeordnet werden kann.

[0032] In den Druckschriften [4] und [6] wurden Verfahren entwickelt, wie in geeigneter Weise IMS-Daten räumlich segmentiert werden können, um verschiedene Gewebestrukturen voneinander zu unterscheiden. Diese Verfahren wurden erfolgreich auf Krebsstudien angewandt (siehe Druckschrift [11]). Das Ergebnis der räumlichen Segmentierung stellt eine entsprechende Segmentierungskarte dar. In der obigen Druckschrift [11] wurden Segmentierungskarten für biologisches Gewebe erzeugt und mit einer optischen Aufnahme des Gewebes sowie mit einer Aufnahme nach einer Hämatoxylin-Eosin-Färbung verglichen. Die Auflösung der Aufnahmen ist dabei wesentlich höher als die IMS-Segmentierungskarte (derzeit 20 µm). Es ist deshalb wünschenswert, die Segmentierungskarte zu vergrößern, so dass sie in geeigneter Weise mit den Aufnahmen in Überdeckung gebracht werden kann. Zu diesem Zweck kann nunmehr das erfindungsgemäße Verfahren eingesetzt werden, welches eine Vergrößerung der Segmentierungskarte mit glatten Kanten zwischen den unterschiedlichen Segmenten generiert.

[0033] Das Verfahren der Erfindung wurde von den Erfindern auf zwei Beispiele von IMS-Datensätzen angewandt. Zum einen wurde die Aufnahme des koronalen Bereichs eines Rattengehirns ohne pathologischen Befund untersucht. Zum anderen wurde ein Bild von über Biopsie entnommenem menschlichem Gewebe untersucht, welches einen neuroendokrinen Tumor enthält. Es konnte dabei gezeigt werden, dass die Segmentierungskarten des Gewebes derart vergrößert werden können, dass die Topologie der einzelnen zusammenhängenden Segmente erhalten bleibt und die Kanten zwischen den Segmenten geglättet sind. Insbesondere stellt das erfindungsgemäße Verfahren dabei sicher, dass kleine Details aus der ursprünglichen Segmentierungskarte (z. B. ein kleiner Farbbereich, der durch einen anderen Farbbereich umgeben wird) nicht verloren gehen. Die soeben beschriebene IMS-Technologie ist nicht auf zwei Dimensionen beschränkt. In der Druckschrift [10] werden beispielsweise 3D-IMS-Daten mit hochaufgelösten Bildern aus anderen Modalitäten, nämlich mit magnetischen Resonanzbildern, co-registriert. In diesem Fall umfasst die Segmentierungskarte ein dreidimensionales Gitter aus Pixeln.

[0034] Bevor eine Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens anhand der Figuren erläutert wird, werden zunächst grundlegende Definitionen eingeführt. Wie erwähnt, kann das Verfahren auf beliebige Dimensionen d angewendet werden. In der nachfolgend beschriebenen Ausführungsform wird das Verfahren zur Vereinfachung jedoch basierend auf d = 2 Dimensionen erläutert. Die ursprüngliche Segmentierungskarte S, welche mit dem Verfahren verarbeitet wird, besteht aus M Segmenten, welche durch folgende Funktion dargestellt werden können:

$S: \Omega \rightarrow \{1, 2, ..., M\}$.

[0035] In der hier beschriebenen Ausführungsform ist dabei Ω ein rechteckiger Bereich, der durch folgendes Gitter aus Pixeln gegeben ist:

$\Omega := \{1, 2, ..., N_1\} \times \{1, 2, ..., N_2\}$.

[0036] Die hier beschriebene Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens erzeugt eine verfeinerte Segmentierungskarte S_{mag}: $\Omega^{mag(n^2)} \rightarrow \{1, 2, ..., M\}$ mit einer höheren Auflösung, welche durch den Vergrößerungsfaktor $n \in N$ auf einem feineren Pixel-Gitter gegeben ist. Dieses Gitter ist wie folgt als rechteckiger Bereich definiert:

$$\Omega^{mag(n^2)} := \left\{1, 1+\frac{1}{n}, ..., N_1 - \frac{1}{n}, N_1\right\} \times \left\{1, 1+\frac{1}{n}, ..., N_2 - \frac{1}{n}, N_2\right\}.$$

[0037] Das hier beschriebene Verfahren stellt eine Pipeline dar, welche sich in folgende drei Teilschritte gliedert:

A: Konkatenation und morphologische Erosion
B: Aufblasen von Topologie-erhaltenden, aktiven Konturen
C: Morphologische Dilatation

[0038] Im Folgenden werden die einzelnen Teilschritte im Detail beschrieben.

[0039] Im ersten Schritt A werden Vorbereitungen für die eigentliche Kantenverfeinerung gemäß Schritt B getroffen. Es wird dabei ein entsprechender Vergrößerungsparameter $\tilde{n} \in \{3, 5, 7, ...\}$ in der Form einer ungeraden Zahl festgelegt. Basierend auf diesem Parameter wird eine Segmentierungskarte S_{cat} auf einem verfeinerten Gitter $\Omega^{mag(\tilde{n}^2)}$ durch einfaches Kopieren von Pixeln erstellt. Das heißt, aus einem Pixel der ursprünglichen Segmentierungskarte wird ein Quadrat aus $\tilde{n} \times \tilde{n}$ Pixeln generiert. Basierend auf diesem vergrößerten Bild S_{cat} wird auf jede Klasse $c \in \{1, 2, ..., M\}$ eine an sich bekannte morphologische Erosion angewendet. Bei der morphologischen Erosion wird für ein jeweiliges Segment, das in einer vorgegebenen Klasse aus den Klassen 1 bis M klassifiziert ist, das mittlere Pixel der Strukturmaske der neuen Klasse c = 0 zugeordnet, falls nicht alle Pixel innerhalb der Strukturmaske zu der vorgegebenen Klasse gehören. Die Strukturmaske der morphologischen Erosion ist dabei derart festgelegt, dass die Topologie der einzelnen zusammenhängenden Segmente erhalten bleibt und keine isolierten Pixel erodiert werden. Dies wird durch eine Strukturmaske in der Form eines Quadrats der Größe $\tilde{n} \times \tilde{n}$ erreicht. Es wird somit sichergestellt, dass durch die morphologische Erosion keine Information betreffend die Topologie der einzelnen Segmente verloren geht. Das Ergebnis des ersten Teilschritts A der Pipeline ist damit folgende Segmentierungskarte:

$$S_{erode}: \Omega^{mag(\tilde{n}^2)} \rightarrow \{0, 1, ..., M\}.$$

[0040] Es ist dabei die neue Klasse c = 0 entstanden, wobei solche Pixel x mit $S_{erode}(x) = 0$, welche nach der morphologischen Erosion keiner der eigentlichen Klassen 1 bis M mehr zugeordnet sind, in diese Klasse eingeordnet werden.

[0041] Der soeben beschriebene Schritt A ist dabei in Fig. 1 und Fig. 2 wiedergegeben. Im Rahmen der Konkatenation wird aus dem Bild I der Fig. 1 ein erstes Bild I1 erzeugt, das nicht mehr separat in den Figuren wiedergegeben ist. Dieses Bild entspricht dem Bild I, wobei nunmehr jedoch die Auflösung gemäß dem Vergrößerungsfaktor ñ vergrößert ist. Es wurde dabei ein Vergrößerungsfaktor von ñ = 5 gewählt, d. h. das Bild I1 ist im Unterschied zum Bild I nunmehr ein Quadrat aus 100×100 Pixeln. Nach der Anwendung der morphologischen Erosion auf das erste Bild I1 ergibt sich das zweite Bild I2, welches in Fig. 2 wiedergegeben ist. Man erkennt, dass durch die morphologische Erosion erodierte, nicht-klassifizierte Pixelbereiche um die einzelnen

Strukturen S1 bis S5 gebildet sind. Diese Bereiche sind mit S0 bezeichnet und schraffiert angedeutet. Im farbigen Bild können diese Bereiche beispielsweise durch weiße Pixel repräsentiert werden.

[0042] Das zweite Bild I2 wird nunmehr dem zweiten Schritt B unterzogen, gemäß dem ein Aufblasen der einzelnen Segmente S1 bis S6 mit an sich bekannten Topologie-erhaltenden aktiven Konturen erfolgt, um hierdurch die erodierten Pixelbereiche S0 mit den entsprechenden Klassen 1 bis M wieder zu füllen und die Kanten der Segmente zu glätten. Dafür werden die Kanten Γ der Klassen in an sich bekannter Weise durch eine Level-Set-Funktion u_0 als Null-Level dieser Funktion codiert. Die in der hier beschriebenen Ausführungsform verwendete Level-Set-Funktion $u_0:\Omega^{mag(\tilde{n}^2)} \rightarrow R$ lautet wie folgt:

$$u_0(x) = \begin{cases} d(x,\Gamma), \text{ falls } S_{erode}(x) \geq 1, \\ -d(x,\Gamma), \text{ falls } S_{erode}(x) = 0, \end{cases} \qquad (1).$$

[0043] Dabei bezeichnet d(x, Γ) den minimalen euklidischen Abstand eines Punktes bzw. Pixels x aus dem Bild I2 zur entsprechenden Kante Γ. Zur Verdeutlichung der Level-Set-Funktion u_0 ist deren Kontur für das Bild I2 in Fig. 5 dargestellt. Diese Figur zeigt in dreidimensionaler Darstellung für jeden der Pixelwerte des Bilds I2 den entsprechenden Wert der Level-Set-Funktion u_0 in der Form einer Gitterstruktur. Die Achsen A1 und A2 präsentieren dabei die Bildebene, wohingegen durch die Achse A3 der Wert der Level-Set-Funktion u_0 repräsentiert wird. Der Null-Level der Level-Set-Funktion u_0 ist durch die Ebene NL angedeutet. Positive Werte der Funktion u_0 liegen in der Darstellung der Fig. 5 unterhalb des Null-Levels NL und negative Werte oberhalb des Null-Levels NL. Man erkennt aus Fig. 5, dass durch negative Werte der Funktion u_0 die entsprechenden erodierten Pixelsegmente S0 um die einzelnen Strukturen S1 bis S5 gebildet werden. Der Null-Level NL beschreibt dabei den Übergang von den entsprechenden Strukturen S1 bis S6 zu den Segmenten S0.

[0044] Um nunmehr die einzelnen Segmente S0 wieder mit Pixeln aus den Klassen 1 bis M zu befüllen, wird die an sich bekannte Methodik der „Geometric Deformable Models" verwendet. Basierend auf dieser Methodik erfolgt eine Zeitintegration der ursprünglichen Level-Set-Funktion u_0. In Anlehnung an die in den Druckschriften [2], [3], [7] und [9] beschriebenen Verfahren werden die Segmente basierend auf der folgenden partiellen Differentialgleichung PDE aufgeblasen bzw. vergrößert:

$$\partial_t u = \left(div\left(\frac{\nabla u}{\|\nabla u\|} \right) + \rho \right) \|\nabla u\| \qquad (2).$$

[0045] Die Startkontur u(0,·) zum Zeitpunkt t = 0 entspricht dabei der obigen Level-Set-Funktion u_0. Der Parameter ρ > 0 ist dabei ein sog. Aufblasfaktor, der den Transport in Richtung des Gradienten ∇u beschreibt. Die Lösung der obigen Differentialgleichung erfolgt durch Zeitintegration, wobei weiter unten näher auf das Lösungsverfahren eingegangen wird.

[0046] Wie sich aus der obigen Beschreibung ergibt, werden somit die Kanten Γ durch den Nullwert der Level-Set-Funktion gemäß obiger Gleichung (1) codiert. Durch Zeitintegration der Gleichung (2) erfolgt implizit ein Aufblasen der jeweiligen Klassen 1 bis M der Segmente. Der obige Term $div(\nabla u/\|\nabla u/\|)\|\nabla u\|$ erzeugt dabei einen Glättungseffekt der Konturen, wohingegen der Term $\rho\|\nabla u\|$ für das Aufblasen sorgt.

[0047] Ein wesentlicher Aspekt des erfindungsgemäßen Verfahrens besteht darin, dass beim Aufblasen der Konturen sichergestellt wird, dass die Topologie der einzelnen Segmente erhalten bleibt. Dies wird im Unterschied zu den obigen Druckschriften [2], [3], [7] und [9], welche eine Kantendetektorfunktion nutzen, durch eine an sich bekannte Topologie-erhaltende Level-Set-Methode erreicht. In der hier beschriebenen Ausführungsform wird die in der Druckschrift [5] beschriebene Methode verwendet. Durch den Einsatz des aus dieser Druckschrift bekannten Verfahrens wird bei der Verfeinerung der Segmentierungskarte der Aufblasungsprozess dann gestoppt, wenn die Topologie sich ändern würde. Die Topologie-erhaltende Level-Set-Methode aus der Druckschrift [5] wurde dabei als allgemeine Lösungsmethode für „Geometric Deformable Models" eingeführt und wird nunmehr erstmalig zur Verfeinerung von Segmentierungskarten verwendet. Im Rahmen der hier beschriebenen Ausführungsform wird die Methode der Druckschrift [5] mit der aus dem Stand der Technik bekannten Narrow-Band-Methode und einem ebenfalls bekannten additiven Operator-Splitting kombiniert, um die partielle Differentialgleichung (2) zu lösen. Es wird dabei auf die in der Druckschrift [1] beschriebene Narrow-Band-Methode und auf das additive Operator-Splitting gemäß der Druckschrift [8] zurückgegriffen.

[0048] Im Folgenden wird detailliert der in der hier beschriebenen Ausführungsform verwendete Algorithmus zur Topologie-erhaltenden Kantenglättung beschrieben. Zunächst wird in den nachfolgend dargelegten Schritten ST1 und ST2 die Narrow-Band-Methode angewandt. Gemäß dieser Methode wird sichergestellt, dass die obige partielle Differentialgleichung nicht in der gesamten Segmentierungskarte gelöst wird, sondern nur in einem schmalen Band, dem sog. Narrow-Band, in der Umgebung des entsprechenden Null-Levels der Level-Set-Funktion. Im Rahmen des Schritts ST1 wird die Methode initialisiert. Dabei wird $k = 0$ und $t_k = 0$ gesetzt. Ferner wird ein kleiner Aufblasfaktor $\rho > 0$ (Größenordnung 10^{-2}) und eine Zeitschrittweite $\tau > 0$ für die Integration mit $\tau\rho \leq 0{,}5$ gewählt. Die Startkontur wird mit der Level-Set-Funktion u_0 gemäß Gleichung (1) initialisiert. Eine binäre Indikator-Funktion B wird gemäß folgender Gleichung festgelegt:

$$B(x)=\begin{Bmatrix}1, \text{ falls } u_0(x)\geq 0,\\ 0, \text{ sonst.}\end{Bmatrix}.$$

[0049] Darüber hinaus wird der Narrow-Band-Parameter $w \in \mathbb{N}$ geeignet gesetzt und das Paar kompatibler Konnektivitäten als $(p, \bar{p}) := (4, 8)$ gewählt, d. h. die Klassen sind 4-verbunden.

[0050] Im Rahmen des Schritts ST2 wird schließlich das Narrow-Band berechnet. Dabei werden alle aktiven Punkte

$$y_i \in \Omega^{mag(\tilde{n}^2)},\ i = 1, \ldots, Q,$$

bestimmt, so dass $|u_i^k| < w$, wobei 2w die Breite des Narrow-Bands und Q die Anzahl der Punkte im Narrow-Band ist. Die Größe $|u_i^k|$ bezeichnet dabei die Level-Set-Funktion für einen entsprechenden aktiven Punkt y_i im k-ten Iterationsschritt.

[0051] Nachfolgend wird Schritt ST3 erläutert, der sich in die Teilschritte (a) bis (f) aufteilt und gemäß dem die Zeitintegration zur Lösung der obigen partiellen Differentialgleichung (1) durchgeführt wird.

Schritt (a):

[0052] Zunächst wird mit dem bekannten Thomas-Algorithmus eine Aktualisierung für alle Narrow-Band-Punkte basierend auf dem additiven Operator-Splitting der Druckschrift [8] wie folgt berechnet:

$$u^{tmp} := \frac{1}{2}\sum_{l\in\{x,y\}}\left(Id - 2\tau A_l\left(u^k\right)\right)^{-1}\left(u^k + \tau\rho\left\|\nabla^+ u\right\|^k\right).$$

[0053] Die Matrix $A_l(u^k) := (a_{i,j}^l(u^k))_{i,j}$ ist dabei gegeben durch:

$$a_{i,j}^l\left(u^k\right) := \begin{cases} \left\|\nabla u\right\|_l^k \dfrac{2}{\left(\left\|\nabla u\right\|_i^k\right)+\left(\left\|\nabla u\right\|_j^k\right)}, & \text{falls } j \in N_l(i),\\ -\left\|\nabla u\right\|_l^k \displaystyle\sum_{m\in N_l(i)} \dfrac{2}{\left(\left\|\nabla u\right\|_i^k\right)+\left(\left\|\nabla u\right\|_m^k\right)}, & \text{falls } j = i,\\ 0, & \text{sonst,}\end{cases}.$$

[0054] Dabei bezeichnet u^k die Level-Set-Funktion im k-ten Iterationsschritt t_k und $N_l(i)$ repräsentiert die zwei Nachbarpixel in Richtung $l \in \{x, y\}$. Die x-Richtung bezeichnet dabei die Orientierung entlang der Achse A1 der Fig. 1 und die y-Richtung die Orientierung entlang der Achse A2 der Fig. 1. In der obigen Gleichung bezeichnet der Ausdruck $\|\nabla^+ u\|^k$ eine sog. Upwind-Approximation von $\|\nabla^+ u\|^k$ durch finite Differenzen. Diese Approximation ist aus dem Stand der Technik bekannt und wird beispielsweise in der Druckschrift [12] beschrieben.

[0055] Für i = 1, ..., Q wird die Level-Set-Funktion u_i^{k+1} an der Stelle y_i zur Zeit $t_{k+1} = t_k + \tau$ durch nachfolgende Schritte (b) bis (f) berechnet, wobei diese Schritte auf der Methode der Druckschrift [5] basieren und garantieren, dass die Topologie der einzelnen Segmente erhalten bleibt.

Schritt (b):

[0056] Falls $\text{sign}(u_l^{tmp}) = \text{sign}(u_l^k)$, wird gesetzt:

$u_l^{k+1} := u_l^{tmp}$.

[0057] Dabei bleibt $B(y_l)$ unverändert und es wird zu dem weiter unten beschriebenen Schritt (f) gegangen. Ist obige Bedingung nicht erfüllt, wird zum nachfolgenden Schritt (c) gegangen.

Schritt (c):

[0058] Es werden die topologischen Zahlen $T_p(y, X)$ und $T_{\bar{p}}(y, \bar{X})$ berechnet, wobei

$$X = \left\{ x \in \Omega^{mag(\tilde{n}^2)} \middle| B(x) = 1 \right\} \text{ und } \bar{X} = \left\{ x \in \Omega^{mag(\tilde{n}^2)} \middle| B(x) = 0 \right\}$$

ist.

Schritt (d):

[0059] Falls $T_p(y_l, X) = 1$ und $T_{\bar{p}}(y, \bar{X}) = 1$, dann wird gesetzt:

$u_l^{k+1} := u_l^{tmp}$ und $B(y_l) := (B(y_l) + 1) \bmod 2$.

[0060] Anschließend wird zu Schritt (f) gegangen. Wenn obige Bedingung nicht erfüllt ist, wird zu Schritt (e) gegangen.

Schritt (e):

[0061] Um die Topologie zu erhalten, wird ein Vorzeichenwechsel der Level-Set-Funktion u in y_l verhindert, indem gesetzt wird:

$u_l^{k+1} := \varepsilon \text{sign}(u_l^k)$,

wobei ε eine kleine positive Konstante ist. Dabei wird $B(y_l)$ nicht verändert.

Schritt (f):

[0062] Es wird $i = i + 1$ gesetzt. Falls $i \leq Q$, wird zu Schritt (b) gegangen, ansonsten wird zu dem nachfolgend erläuterten Schritt ST4 gegangen.

[0063] Im Rahmen des Schritts ST4 erfolgt eine Reinitialisierung, wobei hierzu das Verfahren aus der Druckschrift [1] verwendet wird. Dabei wird u^{k+1} gemäß obiger Gleichung (1) reinitialisiert, falls der Null-Level von u^{k+1} nahe der Grenzen des aktuellen Narrow-Bands ist.

[0064] Anschließend wird in Schritt ST5 eine entsprechende Abbruchbedingung überprüft. Die Abbruchbedingung ist dabei derart definiert, dass das Verfahren beendet wird, falls die Bewegung des Null-Levels zum Erliegen kommt. Ist dies nicht der Fall, wird die Iteration mit $k = k + 1$ fortgesetzt.

[0065] Der obige Algorithmus führt in den Teilschritten (c) bis (e) des Schritts ST3 Buch über die Topologie. Im Rahmen des erfindungsgemäßen Verfahrens wird dabei auch über die entsprechenden Klassennummern $c = 1, ..., M$ Buch geführt. Als Ergebnis erhält man somit die folgende Segmentierungskarte

$$S_{infl} : \Omega^{mag(\tilde{n}^2)} \rightarrow \{0, 1, 2, ..., N\},$$

sobald der Null-Level zum Erliegen kommt. Eine solche Segmentierungskarte ist in Fig. 3 gezeigt und dort mit Bezugszeichen I3 bezeichnet. Diese Segmentierungskarte stellt das Ergebnis des obigen Schritts B dar. Man erkennt, dass nunmehr die Segmente S0 mit erodierten Pixeln wesentlich verkleinert sind und eine Breite von einem Pixel aufweisen. Ferner ist ersichtlich, dass die einzelnen Strukturen gegenüber den Strukturen

der Fig. 2 stark geglättet wurden. In Fig. 6 ist die sich im Rahmen der obigen Lösung der partiellen Differentialgleichung ergebende Level-Set-Funktion u(t,·) für $t \to \infty$ wiedergegeben. Die Darstellungsweise der Fig. 6 entspricht dabei der Darstellungsweise der Fig. 5. Man erkennt aus Fig. 6, dass die erodierten Pixelbereiche S0, in denen die Funktion u negativ ist, wesentlich verkleinert sind.

[0066] In der hier beschriebenen Ausführungsform der Erfindung wird nunmehr im Rahmen des dritten Schritts C eine morphologische Dilatation durchgeführt, um auch die restlichen verbleibenden erodierten Pixelbereiche S0 zu entfernen.

[0067] In der hier beschriebenen Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens ist der morphologischen Dilatation eine Konkatenation der Segmentierungskarte S_{infl} vorgeschaltet. Dabei wird ein jeweiliges Pixel in der Segmentierungskarte zu 2×2 Pixeln kopiert. Darauf wird dann eine morphologische Dilatation mit einer quadratischen 3×3-Strukturmaske angewendet. Bei der morphologischen Dilatation wird dann, wenn zumindest ein Pixel innerhalb der Strukturmaske in den Klassen 1 bis M des gerade betrachteten Segments klassifiziert ist, das mittlere Pixel der Strukturmaske in der gleichen Klasse klassifiziert.

[0068] Mit Hilfe der beschriebenen morphologischen Dilatation mit vorgeschalteter Konkatenation wird eine möglichst gleichmäßige Zuweisung der einzelnen Pixel in den Segmenten S0 zu den beiden benachbarten klassifizierten Pixelbereichen gewährleistet. Schlussendlich erhält man eine verfeinerte Segmentierungskarte mit dem Vergrößerungsfaktor n := 2·ñ. Diese Segmentierungskarte lautet wie folgt:

$$S_{mag} : \Omega^{mag(n^2)} \to \{1,2,...,N\}.$$

[0069] Der Schritt der Konkatenation und morphologischen Dilatation ist nochmals in Fig. 3 und Fig. 4 verdeutlicht. Im Rahmen der Konkatenation, welche nicht separat wiedergegeben ist, wird das Bild I3 der Fig. 3 durch das Kopieren der Pixel in ein entsprechendes Bild I4 gewandelt, welches nunmehr aus einem Pixelquadrat mit 200×200 Pixeln besteht. Auf dieses Bild I4 wird dann die morphologische Dilatation angewendet, welche zu dem Bild I5 der Fig. 4 führt. Man erkennt, dass im Rahmen der morphologischen Dilatation nunmehr alle erodierten Pixelbereiche S0 entfernt sind und ferner sichergestellt ist, dass die Topologie der einzelnen Bereiche S1 bis S6 erhalten bleibt. Ferner wird ersichtlich, dass die Auflösung des Bildes nunmehr 200×200 Pixel beträgt. Gegenüber dem ursprünglichen, digitalisierten Bild der Fig. 1 sind dabei die Kanten in geeigneter Weise geglättet.

[0070] Die oben beschriebenen Ausführungsformen des erfindungsgemäßen Verfahrens weisen eine Reihe von Vorteilen auf. Insbesondere wird mit einer geeigneten Kombination von an sich bekannten Methoden aus einem ursprünglichen digitalisierten Bild ein hochaufgelöstes digitalisiertes Bild erzeugt, in dem die Topologie der festgelegten Segmentierung erhalten bleibt und ferner die Kanten geeignet geglättet sind. Das Verfahren kann dabei universell in beliebigen technischen Bereichen angewendet werden, in denen die einzelnen Pixel von digitalisierten Bildern klassifiziert werden. Beispielsweise können Fernerkundungsbilder in der Form von Satellitenaufnahmen bzw. Flugzeugaufnahmen verarbeitet werden. In solchen Bildern werden basierend auf einer Analyse der aufgenommenen Wellenlängenspektren verschiedenen Segmenten der Erdoberfläche unterschiedliche Klassen zugewiesen, welche entsprechende Beschaffenheiten der Erdoberfläche repräsentieren. Insbesondere kann das erfindungsgemäße Verfahren dazu eingesetzt werden, um eine niedrig-aufgelöste Bodenschatzkarte oder eine niedrig-aufgelöste Karte zur Bodenschätzung (natürliche Bodenfruchtbarkeit) mit einem hochaufgelösten Satellitenbild zu co-registrieren. Weitere Anwendungsbereiche der Erfindung sind die Mustererkennung. Beispielsweise kann in der erfindungsgemäß bestimmten verfeinerten Segmentierungskarte der Fig. 4 die entsprechenden Strukturen in der Form von Kreisen, Rechtecken und Dreiecken erkannt werden. Ein anderer Anwendungsbereich der Erfindung ist die sog. Terahertz-Bildgebung, bei der mit Hilfe von Terahertz-Strahlung Bilder von Gegenständen bzw. Personen erfasst werden.

Literaturverzeichnis

[1] D. Adalsteinsson und J. A. Sethian: „A fast level set method for propagating interfaces", Journal of Computational Physics, 118: 269–277, 1995.
[2] V. Caselles, F. Catté, T. Coll und F. Dibos: „A geometric model for active contours in image processing", Numerische Mathematik, 66(1): 1–31, 1993.
[3] V. Caselles, R. Kimmel und G. Sapiro: „Geodesic active contours", International Journal of Computer Vision, 22(1): 61–79, 1995.

[4] S.-O. Deininger, M. P. Ebert, A. Fütterer, M. Gerhard und C. Röcken: „MALDI imaging combined with hierarchical clustering as a new tool for the interpretation of complex human cancers", Journal of Proteome Research, 7(12): 5230–5236, Dezember 2008.
[5] X. Han, C. Xu und J. L. Prince: „A topology preserving level set method for geometric deformable models", IEEE Transactions an Pattern Analysis and Machine Intelligence, 25(6): 755–768, 2003.
[6] M. Hanselmann, U. Köthe, M. Kirchner, B. Y. Renard, E. R. Amstalden, K. Glunde und F. A. Heeren, Ron M. A. und Hamprecht: „Toward digital staining using imaging mass spectrometry and random forests", Journal of Proteome Research, 8(7): 3558–3567, 2009.
[7] S. Kichenassamy, A. Kumar, P. Olver, A Tannenbaum und A. Yezzi: „Conformal curvature flows: From phase transitions to active vision", Archive for Rational Mechanics and Analysis, 135(3): 275–301.
[8] G. Kühne und J. Weickert: „Fast methods for implicit active contour models", in: S. Osher und N. Paragios, editors, Geometric Level Set Methods in Imaging, Vision and Graphics, Seiten 43–57, Springer, 2003.
[9] R. Malladi, J. A. Sethian und B. C. Vemuri: „Shape modeling with front propagation: A level set approach", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 17(2): 158–175, 1995.
[10] T. K. Sinha, S. Khatib-Shahidi, T. E. Yankeelov, K. Mapara, M. Ehtesham,
D. S. Cornett, B. M. Dawant, R. M. Caprioli und J. C. Gorel: "Integrating spatially resolved three-dimensional MALDI IMS with in vivo magnetic resonance imaging, Nature Methods, 5(1): 57–59, 2008.
[11] A. Walch, S. Rauser, S.-O. Deininger und H. Hofler: „MALDI imaging mass spectrometry for direct tissue analysis: a new frontier for molecular histology", Histochemistry and Cell Biology, 130(3): 421–434, September 2008.
[12] S. Osher und J. A. Sethian: „Fronts Propagating with Curvature-Dependent Speed: Algorithms Based on Hamilton-Jacobi Formulations", Journal of Computational Physics 79, Seiten 12–49, 1988.
[13] R. C. Gonzales und R. E. Woods: "Digital Image Processing.", Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, Second Edition, 2002, Seiten 52–56 und 519–532.
[14] X. Han, C. Xu und J. L. Prince: „A Moving Grid Framework for Geometric Deformable Models", Technical Report, John Hopkins University, 2006.
[15] V. Marion-Poty und S. Miguet: "A new 2-D and 3-D thinning algorithm based an successive border generations", Research Report, Ecole Normale Superieure de Lyon, 1994.
[16] WO 2009/128 042 A1

Patentansprüche

1. Verfahren zur rechnergestützten Verarbeitung eines digitalisierten Bildes (I), wobei das Bild eine Segmentierungskarte umfassend eine Mehrzahl von klassifizierten Pixelbereichen (S1, S2 ..., S6) aus aneinander angrenzenden Pixeln ist, wobei alle Pixel eines jeweiligen klassifizierten Pixelbereichs (S1, S2, ..., S6) der Segmentierungskarte den gleichen Pixelwert aufweisen, der einer jeweiligen Klasse aus einer Mehrzahl von Klassen zugeordnet ist, wobei jede Klasse durch einen anderen Pixelwert repräsentiert wird, wobei das digitalisierte Bild (I) in ein räumlich höher aufgelöstes Bild (I3, I5) gewandelt wird und im Rahmen der Wandlung folgende Schritte durchgeführt werden:
a) aus dem digitalisierten Bild (I) wird ein erstes Bild (I1) in einer höheren räumlichen Auflösung als das digitalisierte Bild (I) erzeugt, indem jedes Pixel des digitalisierten Bildes (I) in ein Pixelfeld aus mehreren Pixeln transformiert wird, welche der Klasse des jeweiligen, der Transformation unterzogenen Pixels zugeordnet sind;
b) die klassifizierten Pixelbereiche (S1, S2, ..., S6) des ersten Bildes (I1) werden zur Generierung eines zweiten Bildes (I2) einer morphologischen Erosion mit einer Strukturmaske unterzogen, so dass die Topologie der klassifizierten Pixelbereiche (S1, S2, ..., S6) erhalten bleibt, wobei Pixel, welche aufgrund der morphologischen Erosion keiner Klasse der Mehrzahl von Klassen mehr zugeordnet sind, einer neuen Klasse zugeordnet werden, wodurch ein oder mehrere erodierte Pixelbereiche (S0) geschaffen werden und alle Pixel eines jeweiligen erodierten Pixelbereichs (S0) der neuen Klasse zugeordnet sind;
c) mit einer Topologie-erhaltenden Methode zur Konturveränderung werden die an die jeweiligen erodierten Pixelbereiche (S0) angrenzenden Konturen der klassifizierten Pixelbereiche (S1, S2, ..., S6) des zweiten Bildes (I2) vergrößert und geglättet, wobei die im Rahmen der Vergrößerung der Konturen zu den klassifizierten Pixelbereichen (S1, S2, ..., S6) hinzukommenden Pixel den entsprechenden Klassen der jeweiligen klassifizierten Pixelbereiche (S1, S2, ..., S6) zugeordnet werden, wodurch sich ein drittes Bild (I3) ergibt.

2. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem in Schritt a) die jeweiligen Pixel des digitalisierten Bildes (I) in (n×n) -Pixelquadrate transformiert werden, wobei n eine ungerade Zahl ist und die Strukturmaske bei der Durchführung der morphologischen Erosion ein (m×m)-Pixelquadrat ist, wobei m eine ungerade Zahl kleiner oder gleich n ist.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, bei dem die klassifizierten Pixelbereiche (S1, S2, ..., S6) im dritten Bild (I3) oder in einem vierten Bild (I4), das aus einer Nachbearbeitung des dritten Bildes (I3) hervorgeht, zur Generierung eines fünften Bildes (I5) einer morphologischen Dilatation mit einer Strukturmaske unterzogen werden, so dass die Pixel in den erodierten Pixelbereichen (S0) in Pixel der übrigen klassifizierten Pixelbereiche (S1, S2, ..., S6) gewandelt werden, wobei die gewandelten Pixel der entsprechenden Klasse des jeweiligen klassifizierten Pixelbereichs (S1, S2, ..., S6) zugeordnet werden.

4. Verfahren nach Anspruch 3, bei dem das dritte Bild (I3) derart nachbearbeitet wird, dass jedes Pixel des dritten Bildes (I3) in ein Pixelfeld aus mehreren Pixeln transformiert wird, welche der Klasse des jeweiligen, der Transformation unterzogenen Pixels zugeordnet sind, wodurch das vierte Bild (I4) in einer höheren Auflösung als das dritte Bild (I3) erhalten wird.

5. Verfahren nach Anspruch 4, bei dem die jeweiligen Pixel des vierten Bildes (I4) in (1×1)-Pixelquadrate transformiert werden, wobei 1 eine gerade Zahl ist, wobei die Strukturmaske bei der Durchführung der morphologischen Dilatation ein (1 + 1)×(1 + 1)-Pixelquadrat ist.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Topologie-erhaltende Methode zur Konturveränderung eine Kante zwischen einem klassifizierten Pixelbereich (S1, S2, ..., 56) und einem erodierten Pixelbereich (S0) im zweiten Bild (I2) über den Null-Level (NL) einer Level-Set-Funktion u_0 definiert.

7. Verfahren nach Anspruch 6, bei dem die Level-Set-Funktion derart definiert ist, dass der Betrag der Level-Set-Funktion u_0 größer wird, je weiter ein Pixel von der Kante entfernt ist.

8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Topologie-erhaltende Methode zur Konturveränderung auf der Zeitintegration einer partiellen Differentialgleichung beruht.

9. Verfahren nach Anspruch 8 in Kombination mit Anspruch 6 oder 7, bei dem die partielle Differentialgleichung wie folgt lautet:

$$\partial_t u = \left(div\left(\frac{\nabla u}{\|\nabla u\|} \right) + \rho \right) \|\nabla u\|,$$

wobei ∇ der räumliche Gradient der Level-Set-Funktion für das zweite Bild (I2) ist und der Parameter $\rho > 0$ ein Aufblasfaktor ist, der den Transport in Richtung des Gradienten ∇u beschreibt.

10. Verfahren nach Anspruch 8 oder 9, bei dem die partielle Differentialgleichung mittels der Narrow-Band-Methode und/oder additivem Operator-Splitting gelöst wird.

11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem mit dem Verfahren ein digitalisiertes Bild (I) verarbeitet wird, welches über bildgebende Massenspektroskopie ermittelt ist, und/oder das verarbeitete Bild (I3, I5) mit einem oder mehreren Bildern kombiniert wird, welche über bildgebende Massenspektroskopie ermittelt sind.

12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem mit dem Verfahren ein digitalisiertes Bild (I) in der Form einer Fernerkundungsaufnahme, insbesondere aufgenommen durch ein Multispektral- und/oder Hyperspektralinstrument, verarbeitet wird und/oder das verarbeitete Bild (I3, I5), mit einer oder mehreren Fernerkundungsaufnahmen kombiniert wird.

13. Verfahren nach einem vorhergehenden Ansprüche, bei dem mit dem Verfahren ein digitalisiertes Bild (I) verarbeitet wird, welches mit einer medizinischen Bildgebungsvorrichtung aufgenommen ist, und/oder das verarbeitete Bild (I3, I5) mit einem oder mehreren Bildern kombiniert wird, welche mit einer medizinischen Bildgebungsvorrichtung aufgenommen sind.

14. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem ein digitalisiertes Bild (I) verarbeitet wird, welches mittels Terahertz-Strahlung aufgenommen ist, und/oder das verarbeitete Bild (I3, I5) mit einem oder mehreren Bildern kombiniert wird, welche mittels Terahertz-Strahlung aufgenommen sind.

15. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem das verarbeitete Bild (I3, I5) einer Mustererkennung unterzogen wird.

16. Vorrichtung zur rechnergestützten Verarbeitung eines digitalisierten Bildes (I), mit einer Verarbeitungseinheit zur Wandlung des digitalisierten Bildes (I) in ein räumlich höher aufgelöstes Bild (I3), welche zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 15 ausgestaltet ist, wobei das Bild eine Segmentierungskarte umfassend eine Mehrzahl von klassifizierten Pixelbereichen (S1, S2 ..., S6) aus aneinander angrenzenden Pixeln ist, wobei alle Pixel eines jeweiligen klassifizierten Pixelbereichs (S1, S2, ..., S6) der Segmentierungskarte den gleichen Pixelwert aufweisen, der einer jeweiligen Klasse aus einer Mehrzahl von Klassen zugeordnet ist, wobei jede Klasse durch einen anderen Pixelwert repräsentiert wird, wobei die Verarbeitungseinheit beinhaltet:
– ein erstes Mittel zur Erzeugung eines ersten Bildes (I1) aus dem digitalisierten Bild (I) in einer höheren räumlichen Auflösung als das digitalisierte Bild, indem jedes Pixel des digitalisierten Bildes (I) in ein Pixelfeld aus mehreren Pixeln transformiert wird, welche der Klasse des jeweiligen, der Transformation unterzogenen Pixels zugeordnet sind;
– ein zweites Mittel zur Erzeugung eines zweiten Bildes (I2), indem die klassifizierten Pixelbereiche (S1, S2, ..., S6) des ersten Bildes (I1) einer morphologischen Erosion mit einer Strukturmaske unterzogen werden, so dass die Topologie der klassifizierten Pixelbereiche (S1, S2, ..., S6) erhalten bleibt, wobei Pixel, welche aufgrund der morphologischen Erosion keiner Klasse der Mehrzahl von Klassen mehr zugeordnet sind, einer neuen Klasse zugeordnet werden, wodurch ein oder mehrere erodierte Pixelbereiche (S0) geschaffen werden und alle Pixel eines jeweiligen erodierten Pixelbereichs (S0) der neuen Klasse zugeordnet sind;
– ein drittes Mittel zur Erzeugung eines dritten Bildes (I3), indem mit einer Topologie-erhaltenden Methode zur Konturveränderung die an die jeweiligen erodierten Pixelbereiche (S0) angrenzenden Konturen der klassifizierten Pixelbereiche (S1, S2, ..., S6) des zweiten Bildes (I2) vergrößert und geglättet werden, wobei die im Rahmen der Vergrößerung der Konturen zu den klassifizierten Pixelbereichen (S1, S2, ..., S6) hinzukommenden Pixel den entsprechenden Klassen der jeweiligen klassifizierten Pixelbereichen (S1, S2, ..., S6) zugeordnet werden, wodurch sich ein drittes Bild (I3) ergibt.

17. Maschinenlesbarer Datenträger mit einem darauf gespeicherten Programmcode zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 15, wenn der Programmcode durch einen Rechner ausgeführt wird.

Es folgen 6 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

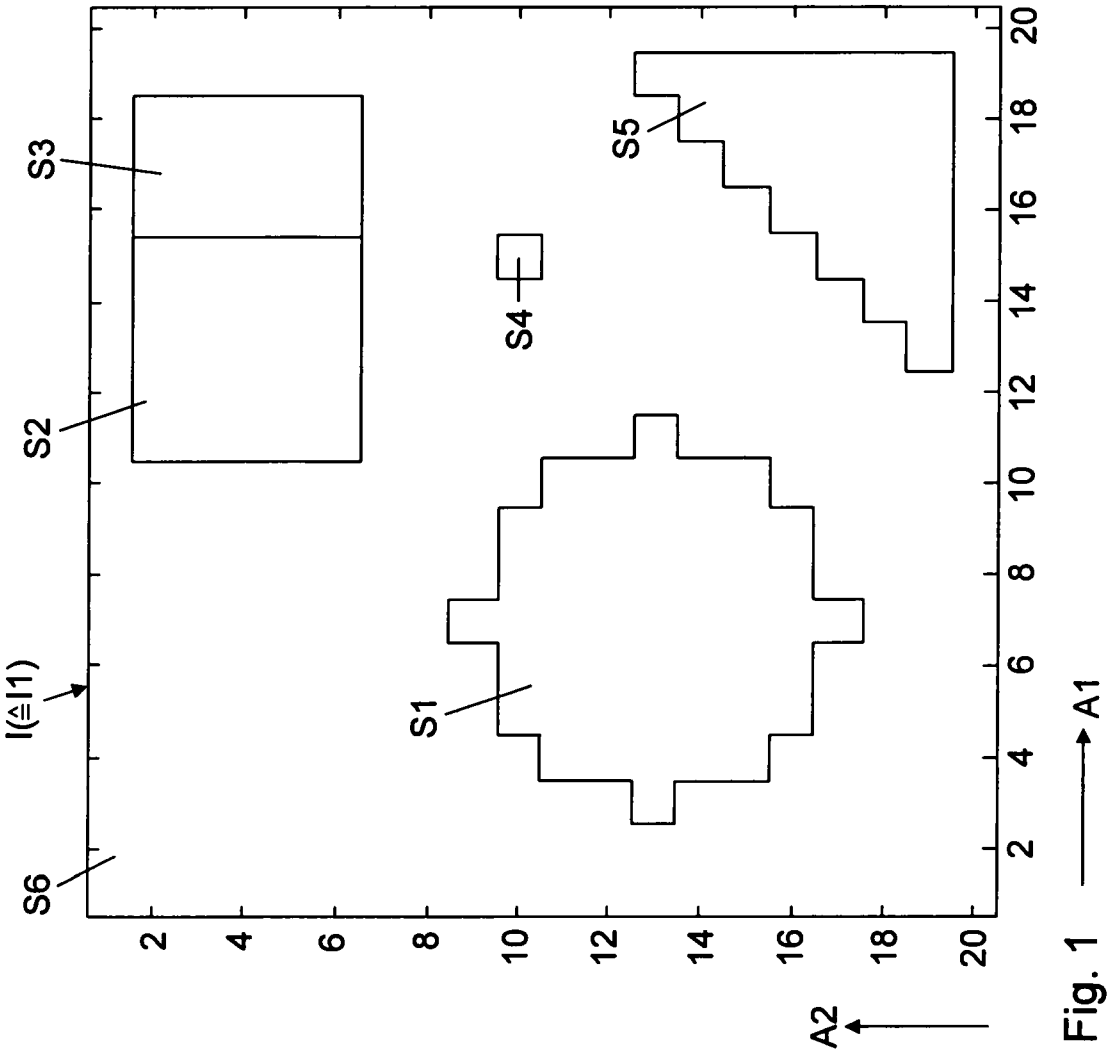


Fig. 1

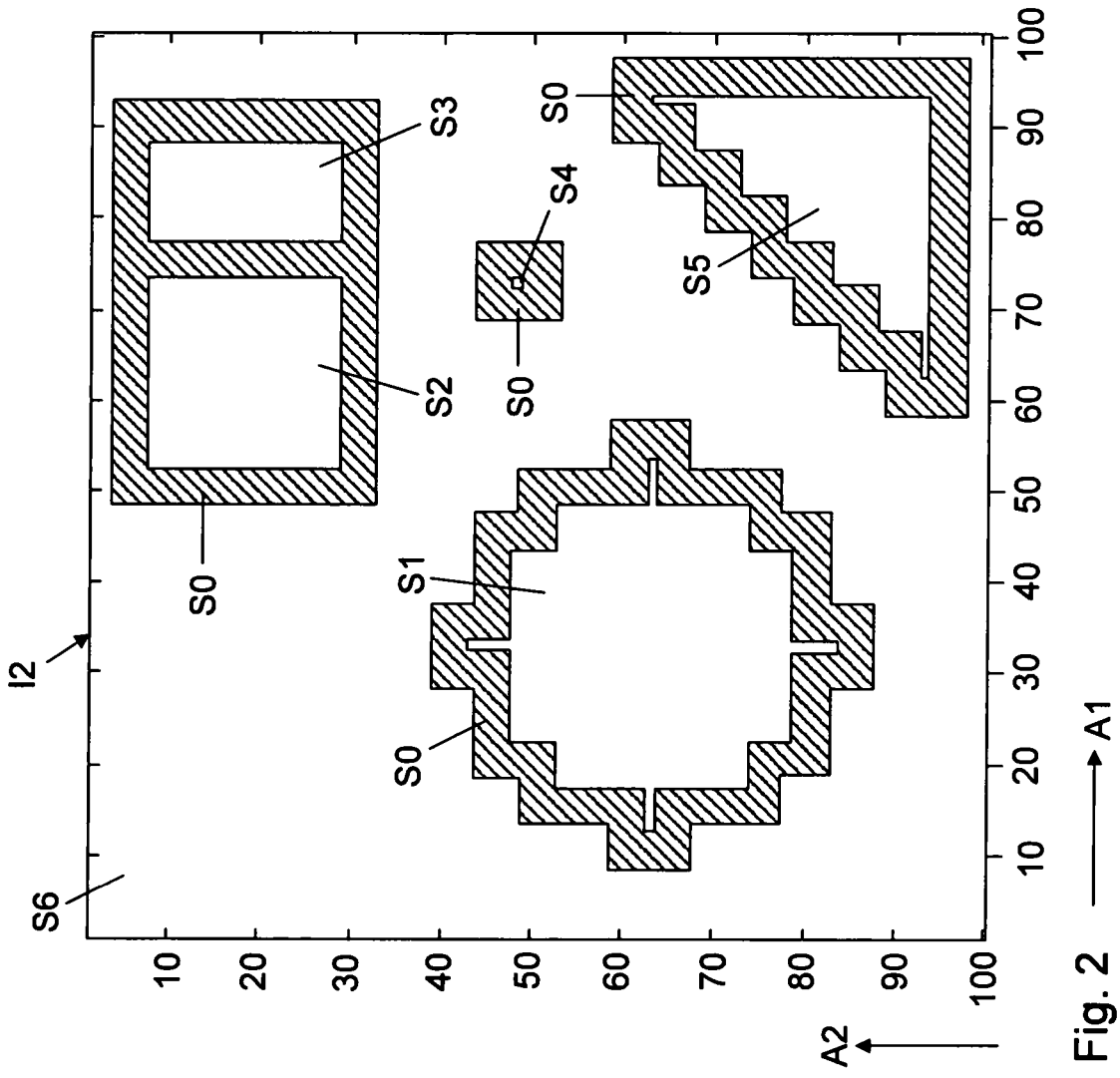


Fig. 2

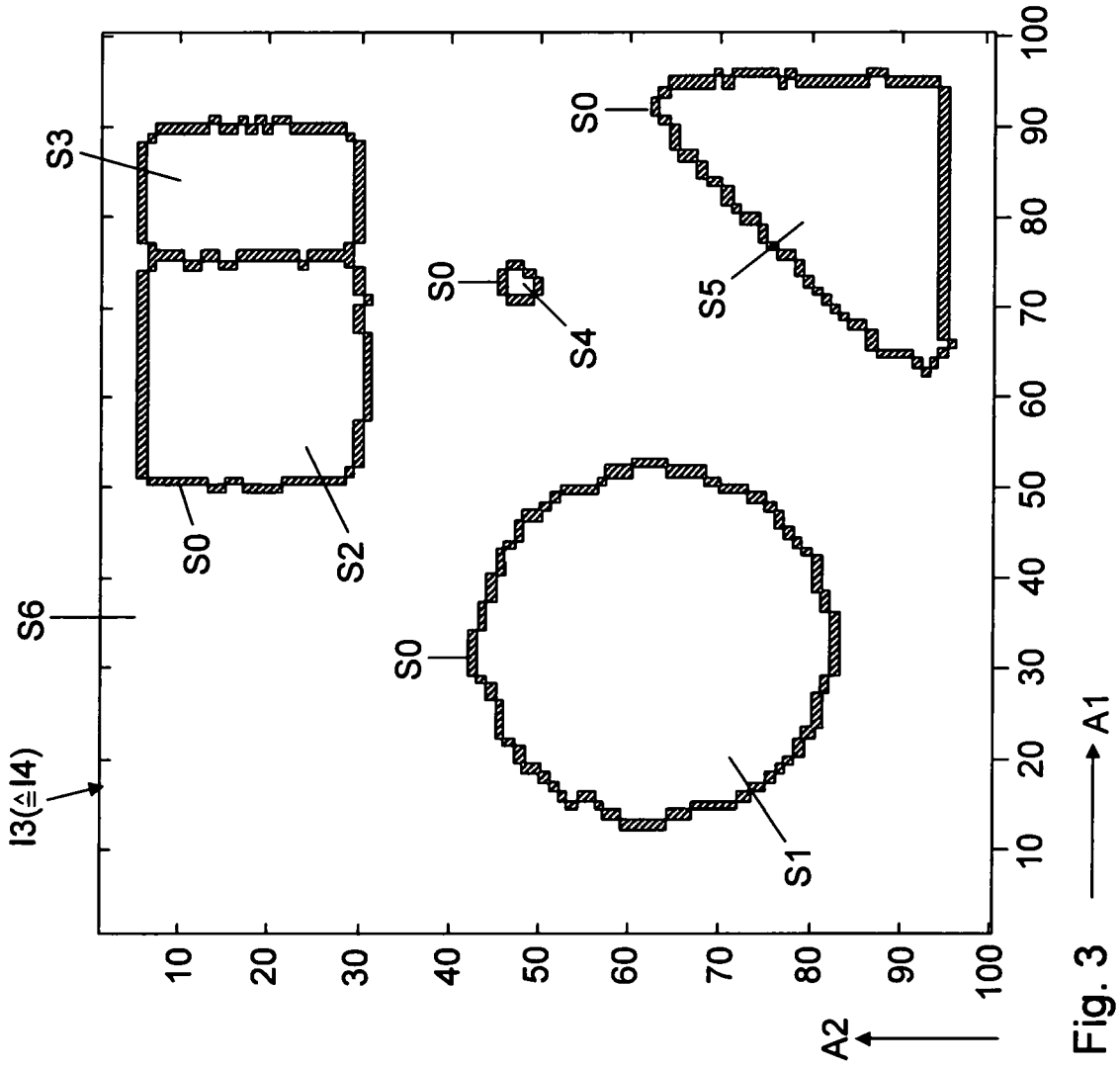


Fig. 3

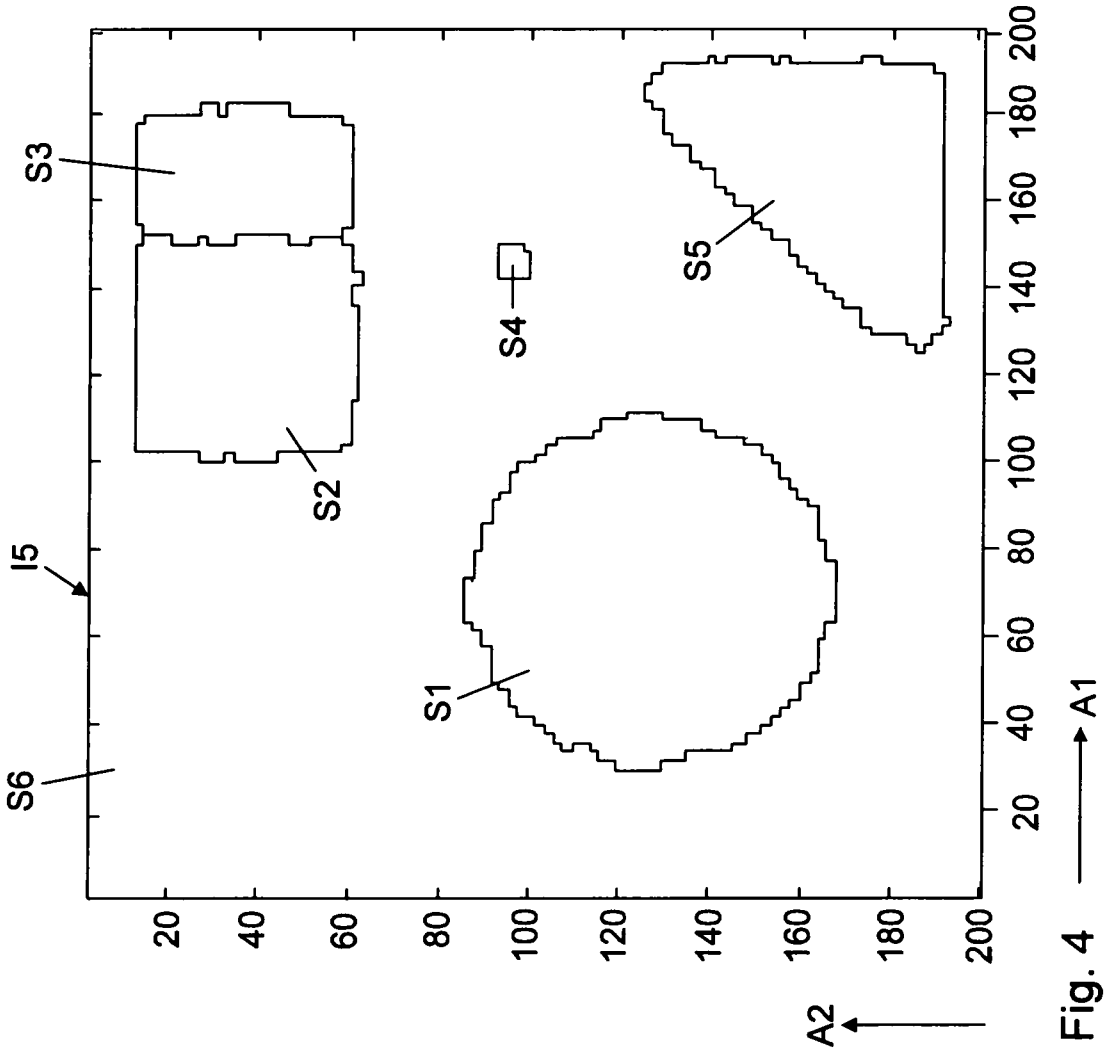
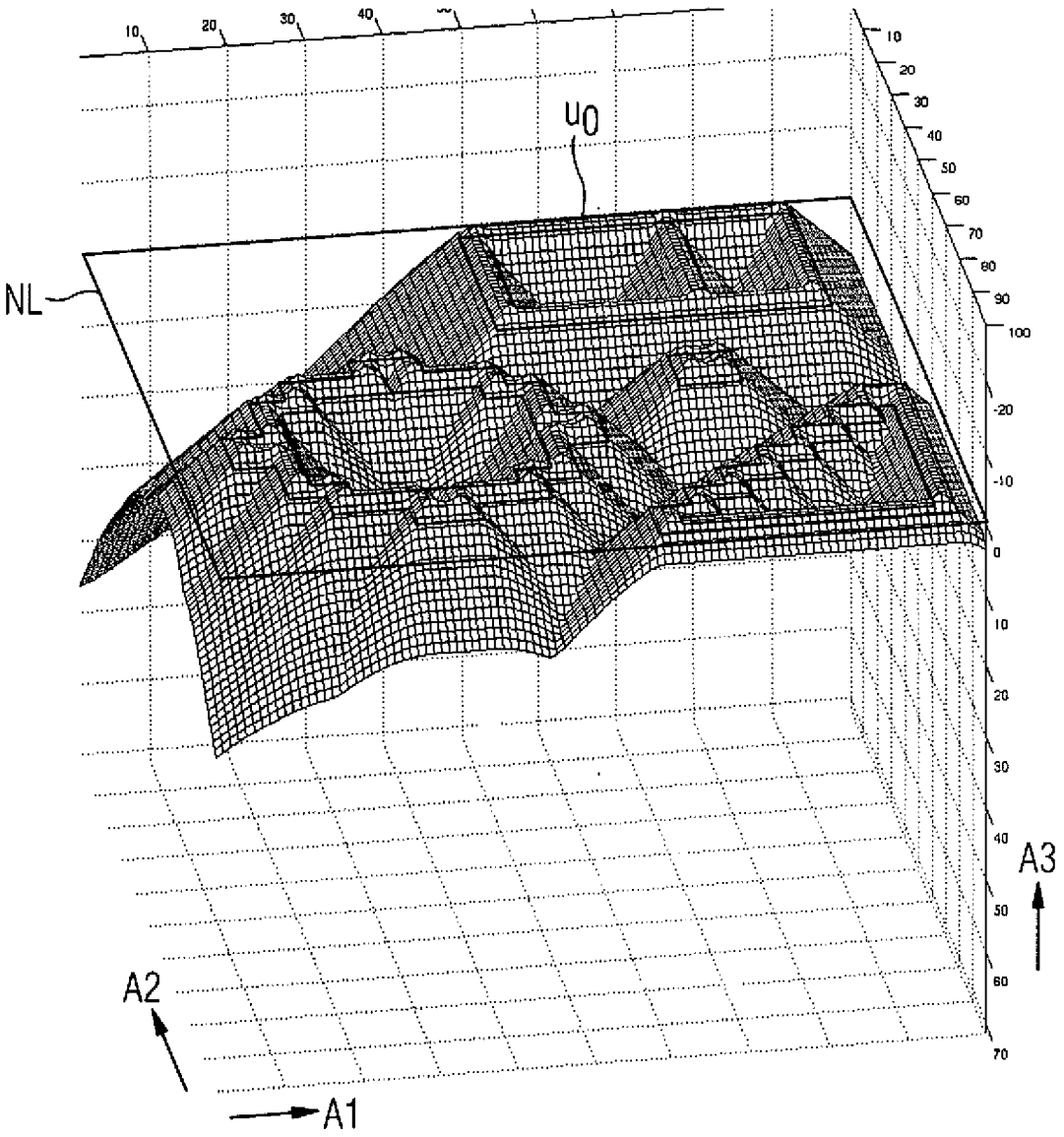


Fig. 4

FIG 5


10
20
30
40
u0
NL
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
-20
-10
0
10
20
30
40
50
60
70
A3
A2
A1

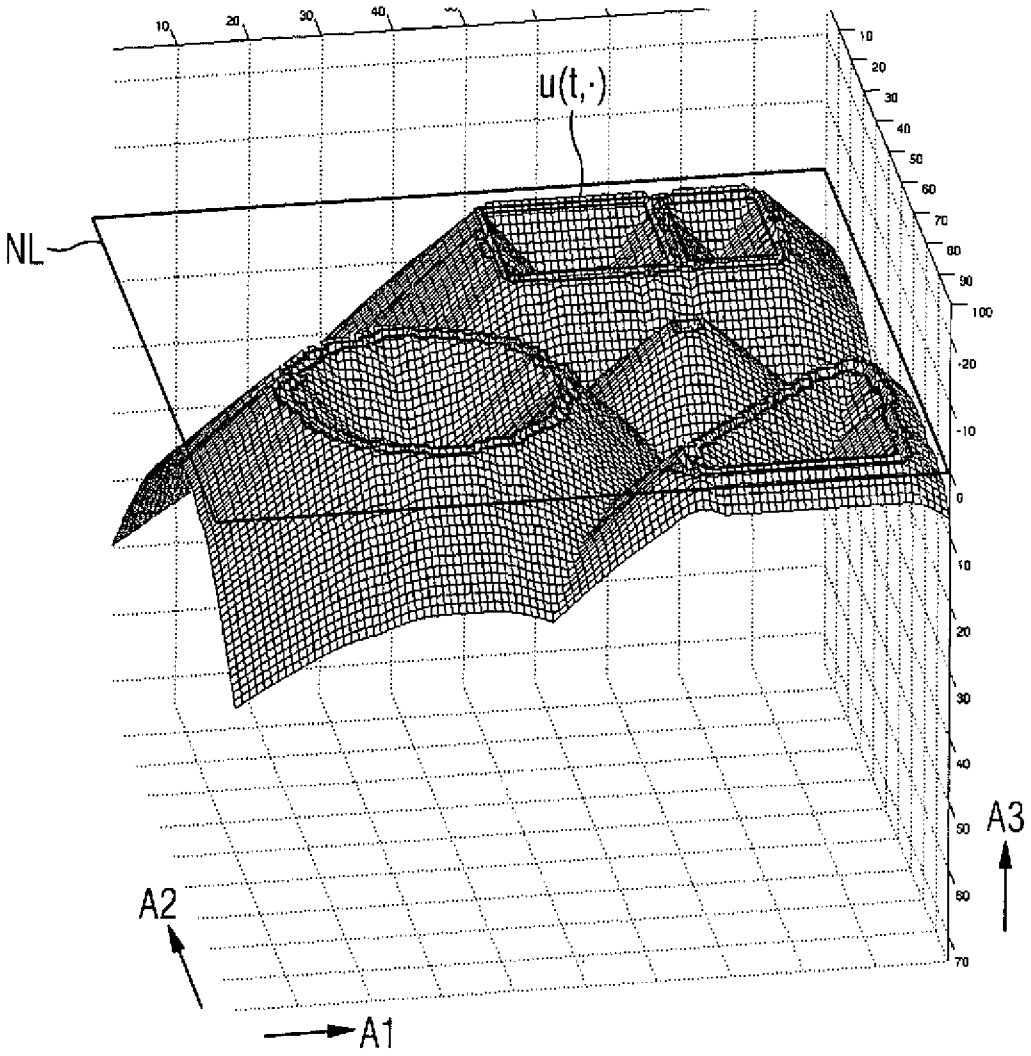



FIG 6