



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 600 37 865 T2** 2008.12.04

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 1 110 373 B1**

(51) Int Cl.⁸: **H04N 1/047** (2006.01)

(21) Deutsches Aktenzeichen: **600 37 865.9**

(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/GB00/02603**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **00 942 293.2**

(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2001/005140**

(86) PCT-Anmeldetag: **07.07.2000**

(87) Veröffentlichungstag
der PCT-Anmeldung: **18.01.2001**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **27.06.2001**

(97) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung beim EPA: **23.01.2008**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **04.12.2008**

(30) Unionspriorität:
99305483 09.07.1999 EP

(74) Vertreter:
Schoppe, Zimmermann, Stöckeler & Zinkler, 82049 Pullach

(73) Patentinhaber:
Hewlett-Packard Development Co., L.P., Houston, Tex., US

(84) Benannte Vertragsstaaten:
DE, FR, GB

(72) Erfinder:
PILU, Maurizio, Bristol BS7 0RJ, GB

(54) Bezeichnung: **BILDERZEUGUNGSSYSTEM FÜR GEKRÜMMTE OBERFLÄCHEN**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf ein System und ein Verfahren zum Entwölben von Bildern einer entwickelbaren Oberfläche einschließlich entwickelbarer gewellter Oberflächen und insbesondere von Bildern gewellter Dokumente.

[0002] Erfasste Bilder einer gewellten Oberfläche weisen im Allgemeinen Verzerrungen auf, die durch Bildperspektive, Versetzung und Verdichtung oder Dehnung, die durch eine unebene oder gewellte Oberfläche bewirkt wurden, verursacht sind. Verschiedene Mittel einschließlich Standardtriangulierungstechniken können verwendet werden, um das Oberflächenprofil aus erfassten Bildern der Oberfläche zu berechnen. Beispielsweise kann eine Kamera mit einem strukturierten Lichtmuster in einem auflagelosen Dokumentabbildungssystem verwendet werden, um das Bild einer Seite oder eines gebundenen Buchs zusammen mit der Tiefeninformation, die aus dem Lichtmuster gefolgert werden kann, zu erfassen.

[0003] Tischflachbettscanner sind bei Büroabbildungsanwendungen sehr verbreitet. Auch wenn diese relativ kostengünstig sind und gut arbeiten, ist der Nachteil, dass diese unvermeidlich sehr viel Platz auf einem Schreibtisch beanspruchen, was stets ein wichtiger Punkt ist.

[0004] Digitalkameraprodukte werden in vielen Bereichen der Einzelbild- und Laufbildphotographie immer häufiger eingesetzt und als Folge davon immer kostengünstiger. Jedoch werden derartige Kameras nach wie vor fast ausschließlich zum Photographieren von Menschen oder Plätzen verwendet und müssen erst noch zur Verwendung bei Büroabbildungsanwendungen angepasst werden. Ein Grund dafür ist, dass ein Dokument, wie beispielsweise ein Stück Papier oder ein offenes Buch, das mit den beschriebenen Seiten nach oben auf einer Tragefläche liegt, im Allgemeinen nicht flach ist, da das Dokument nicht wie in einem Flachbettscanner gegen eine transparente Auflage gedrückt wird.

[0005] Es kann auch vorkommen, dass Dokumente nicht in einem konsistenten Winkel zu der Kamera liegen. In dem Fall des Buchs ist dann der Rücken in einem variablen Winkel gegenüber der optischen Achse der Kameralinse versetzt.

[0006] Demzufolge wirft eine kamerabasierte Erfassung eines Dokuments das Problem einer Verzerrung des erfassten Bilds aufgrund von Bildperspektive, Versetzung und Verdichtung oder Dehnung, die durch die unebene Oberfläche und Seitenkräuselung des Blatts oder gebundenen Buchs hervorgerufen sind, auf.

[0007] Seitenkräuselung ist eines der größten Probleme, die beim Erfassen eines Dokuments mit einer Kamera auftauchen. Der gewellte Teil des Dokuments kann nur schlecht auf einem Bildschirm und auf Druckern wiedergegeben werden und präsentiert Schatten. Auch lassen sich bei einem solchen „gewölbten“ Bild eine Zusammensetzung und eine optische Schriftzeichenerkennung nur schwer durchführen.

[0008] Ein Regenerieren oder „Entwölben“ einer Seitenkräuselung ist ein allgemein schwierig zu lösendes Problem. Bekannte Verfahren umfassen ein Folgern von Formen aus Schraffierung, aus Textur, aus Gesamtumrissen von Textzeilen. Diese Verfahren haben sich bislang als schwach erwiesen und erfordern oft eine beträchtliche Menge an Computerverarbeitungsleistung.

[0009] Ein Ansatz zum Lösen dieses Problems ist, strukturiertes Licht zu verwenden, um Tiefeninformationen, wie beispielsweise die Entfernung der Seite von einer Ebene im rechten Winkel zu der optischen Achse der Kamera, zu erhalten. Ein derartiger Ansatz ist in der Patentschrift US 5,760,925 offenbart, in der ein Dokument von einer unten liegenden Tragefläche getragen ist, wobei eine Kamera oberhalb und an einer Seite der Tragefläche angebracht ist, und ein Lichtstreifenprojektor an einer gegenüberliegenden Seite der Tragefläche angebracht ist. Der Lichtstreifenprojektor projiziert ein Paar von Lichtstreifen auf das Dokument. Die Lichtstreifen sind für Abschnitte des Dokuments, die dieselbe Höhe über einer Referenzoberfläche, die als die Tragefläche angesehen wird, aufweisen, parallel. Das Dokument ist so orientiert, dass der Hauptteil der Kräuselung in derselben Richtung wie die Lichtstreifen liegt, da jedoch das Dokument in einer Querrichtung unter Umständen nicht flach ist, wird die Form des Dokuments zwischen den Lichtstreifen linear interpoliert.

[0010] Dieses System kann im Prinzip ein Bild des Dokuments nur dann, wenn keine Kräuselung quer zu den Lichtstreifen vorliegt, erfassen und bezüglich der Seitenkräuselung korrigieren. Auch wenn im Prinzip und zu höheren Kosten mehr parallele Lichtstreifen hinzugefügt werden können, um zusätzliche Kräuselungsinformationen in der Querrichtung zu erhalten, belastet dies in der Praxis die verfügbare Verarbeitungsleistung und die verfügbare Zeit zum Erfassen und Korrigieren von Dokumentkräuselung bei einem Produkt, das in Bezug auf

Kosten und Geschwindigkeit kommerziell attraktiv ist, enorm.

[0011] Es ist eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, diese Punkte anzugehen.

[0012] Folglich stellt die Erfindung ein Abbildungssystem zum Abbilden einer nicht planaren entwickelbaren Oberfläche bereit, wobei das System einen Prozessor aufweist, der mit einer Bilderfassungseinrichtung verknüpft ist und zu Folgendem in der Lage ist: Erfassen zumindest eines Bilds der Oberfläche, wobei das Bild eine Wölbung entsprechend der nicht planaren Oberfläche aufweist; und zum Erzeugen eines ersten Satzes von Punkten daraus, die das dreidimensionale Profil der nicht planaren Oberfläche bezüglich einer planaren Referenzoberfläche darstellen, gekennzeichnet dadurch, dass der Prozessor angeordnet ist, um an den ersten Satz von Punkten einen zweiten Satz von Punkten anzupassen, die ein nicht entwickelbares verzerrtes dreieckiges Netz darstellen, das dem dreidimensionalen Profil der nicht planaren Oberfläche nahekommt; nachfolgend Lockern des zweiten Satzes von Punkten, derart, dass das dreieckige Netz entwickelbar ist; und Verwenden des zweiten Satzes von Punkten, um das Bild texturabzubilden, um das Bild zu entwölben.

[0013] Gewelltes Papier kann mathematisch durch eine entwickelbare Oberfläche dargestellt sein, die die Eigenschaft aufweist, mit der Ebene isometrisch zu sein. Praktisch ausgedrückt bedeutet dies, dass Papier auf eine Ebene entkräuselt und/oder entfaltet werden kann, ohne es zu zerreißen. Ein Satz gemessener dreidimensionaler Datenpunkte, die eine gewölbte entwickelbare Oberfläche darstellen, kann aus verstreuten und/oder rauschhaften Daten bestehen, in welchem Fall es nicht möglich ist, eine allgemeine gemittelte Oberfläche wie beispielsweise eine bikubische Nut auf die Daten anzupassen und die Oberfläche auf eine Ebene zu entrollen oder „texturabzubilden“, ohne umfassende Verzerrungen zu verursachen. Mit der aktuellen Erfindung ist das Netz vor dem Texturabbilden entwickelbar und stellt somit zumindest zu einem gewissen Grad das originale entwickelbare Oberflächenprofil der nicht planaren Oberfläche wieder her. In dem Fall eines Dokumentabbildungssystems erlaubt dies, dass das Bild des Dokuments entwölbt wird.

[0014] Gemäß der vorliegenden Erfindung ist auch ein Verfahren zum Abbilden einer nicht planaren entwickelbaren Oberfläche unter Verwendung eines Abbildungssystems bereitgestellt, das einen Prozessor aufweist, der mit einer Bilderfassungseinrichtung verknüpft ist, das die folgenden Schritte aufweist:

- i) Erfassen zumindest eines Bilds der Oberfläche, wobei das Bild eine Wölbung entsprechend der nicht planaren Oberfläche aufweist;
- ii) Erzeugen, aus dem Bild, eines ersten Satzes von Punkten, die das dreidimensionale Profil der nicht planaren Oberfläche bezüglich einer planaren Referenzoberfläche darstellen;

gekennzeichnet dadurch, dass das Verfahren die folgenden Schritte aufweist:

- iii) Anpassen eines zweiten Satzes von Punkten, die ein nicht entwickelbares verzerrtes dreieckiges Netz darstellen, das dem dreidimensionalen Profil der nicht planaren Oberfläche nahekommt, an den ersten Satz von Punkten;
- iv) nachfolgend Lockern des zweiten Satzes von Punkten, derart, dass das verzerrte Netz sich in einem entwickelbaren Zustand befindet; und
- v) Verwenden des gelockerten zweiten Satzes von Punkten, um das Bild texturabzubilden, um das Bild zu entwölben.

[0015] Der Prozess des Lockerns eines verzerrten Netzes erlaubt es, dass das Netz Abweichungen von einem entwickelbaren Zustand in dem ersten Satz von Punkten herausmittelt, was zu einer besseren Rückgewinnung der ursprünglichen entwickelbaren Oberfläche aus den gestreuten und/oder rauschhaften Daten führen kann.

[0016] Vorzugsweise wird vor dem Schritt iii) eine „anfängliche“ Oberfläche an den ersten Satz von Punkten angepasst, und das Netz wird in Schritt iii) an die anfängliche Oberfläche angepasst. Die anfängliche Oberfläche kann beispielsweise eine bikubische Nutoberfläche sein. Diese ist im Allgemeinen keine entwickelbare Oberfläche, in welchem Fall das Netz sich verzerrt, wenn es an die anfängliche Oberfläche angepasst wird.

[0017] Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel findet jedoch die Verzerrung des Netzes in zwei Stufen statt, so dass der zweite Satz von Punkten besser an den ersten Satz von Punkten angepasst werden kann. Hier kann die anfängliche Oberfläche eine entwickelbare Oberfläche wie beispielsweise eine Ebene sein, die in einer Routine der kleinsten Quadrate an den ersten Satz von Punkten angepasst wird. Das Netz wird dann nicht in einer ersten Stufe, wenn es an die anfängliche Oberfläche angepasst wird, sondern stattdessen in einer zweiten Stufe verzerrt, in der nach dem Anpassen des Netzes an die anfängliche Oberfläche zumindest einige Punkte des zweiten Satzes von Punkten näher zu entsprechenden Punkten des ersten Satzes von Punkten

bewegt werden, währenddessen das Netz verzerrt wird.

[0018] Wenn manche Punkte in dem zweiten Satz von Punkten nicht genau genug beliebigen der Punkte in dem ersten Satz von Punkten entsprechen, müssen diese Punkte nicht an den ersten Satz von Punkten angepasst werden.

[0019] Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel der Erfindung findet die Lockerung des Netzes in einem iterativen Prozess statt, in dem der zweite Satz von Punkten inkremental eingestellt wird, bis Entfernungen zwischen Punkten in dem zweiten Satz von Punkten ausgeglichen sind, wodurch eine entwickelbare Oberfläche dargestellt wird, die einem physikalisch gültigen Modell eines deformierten Dokuments nahekommt.

[0020] Die Bilderfassungseinrichtung kann ein strukturiertes Lichtmuster projizieren, das getrennte Lichtstreifen über der nicht planaren entwickelbaren Oberfläche bildet, wobei der erste Satz von Punkten aus den Lichtstreifen erzeugt wird. Anschließend kann der Schritt ii) die folgenden Schritte aufweisen:

- a) Erzeugen eines Differenzbilds durch Abziehen einer Differenz zwischen einem mit den Streifen erfassten Bild und einem ohne die Streifen erfassten Bild;
- b) Unterziehen des Differenzbilds einer Schwellenbewertung, um Abschnitte unterhalb einer Schwelle auszusondern;
- c) Zählen erfasster Streifen über dem Differenzbild, um einzelne Streifen zu identifizieren;
- d) Triangulieren des Bilds der nicht planaren Oberfläche an Punkten, die identifizierten Streifen entsprechen, um den ersten Satz von Punkten zu erzeugen.

[0021] Die Lichtstreifen können aus sichtbarer oder unsichtbarer optischer Strahlung, im Besonderen Strahlung des nahen Infrarots, gebildet sein und können von einer beliebigen geeigneten Quelle, beispielsweise einer Leuchtdiode oder einer Laserdiode erzeugt sein.

[0022] Die Erfindung wird nun ausführlicher lediglich mittels Beispielen und mit Bezug auf die beiliegenden Zeichnungen beschrieben. Es zeigen:

[0023] [Fig. 1](#) eine schematische perspektivische Ansicht eines Dokumentabbildungssystems gemäß einem bevorzugten Ausführungsbeispiel der Erfindung, mit einer Kamera, die ein Detektorarray aufweist, das zusammen mit einem Lichtstreifenprojektor an einem Pfosten angebracht ist, und ein abzubildendes Dokument überblickt;

[0024] [Fig. 2](#) eine Ansicht eines offenen Buchs, wie es durch die Kamera abgebildet ist;

[0025] [Fig. 3](#) eine Ansicht des offenen Buchs, wobei ein Lichtstreifenmuster auf das Buch projiziert ist;

[0026] [Fig. 4](#) eine schematische perspektivische Ansicht, die ein strukturiertes Lichtmuster zeigt, das durch den Lichtstreifenprojektor erzeugt ist und divergierende Schichten von Licht zeigt, die sich konkav nach innen zu einer zentralen planaren Lichtschicht hin beugen;

[0027] [Fig. 5](#) eine graphische Darstellung von Lichtstreifen, die durch einen Schnittbereich des strukturierten Lichtmusters der [Fig. 3](#) mit einer quer zu den Schichten liegenden Ebene geformt sind;

[0028] [Fig. 6](#) eine graphische Darstellung eines Polynoms, das durch fünf Punkte, die aus einem der Lichtstreifen der [Fig. 5](#) genommen werden, angepasst ist;

[0029] [Fig. 7](#) eine graphische Darstellung eines parametrischen Lichtschichtkegels, der aus Polynomen, wie denen der [Fig. 6](#) aufgebaut ist;

[0030] [Fig. 8](#) ein Flussdiagramm, das einen Kalibrierungsprozess für die Roto-Translation zwischen der Kamera und dem Lichtstreifenprojektor darstellt;

[0031] [Fig. 9A](#) und [Fig. 9B](#) den Fehler bei einer Erfassung des Profils einer planaren Oberfläche unter Verwendung des Dokumentabbildungssystems, wenn ein anfänglicher Schätzwert der Roto-Translation verwendet wird;

[0032] [Fig. 10A](#) und [Fig. 10B](#) den Fehler bei einer Erfassung des Profils einer planaren Oberfläche nach einer Kalibrierung der Roto-Translation gemäß dem Flussdiagramm der [Fig. 8](#);

- [0033] [Fig. 11A](#) und [Fig. 11B](#) jeweils die Fehler bei der Erfassung einer planaren Oberfläche mit und ohne Radialverzerrungskorrektur;
- [0034] [Fig. 12](#) die Ergebnisse einer Streifenerfassung und eines Kennzeichnungsprozesses;
- [0035] [Fig. 13](#) eine Lichtschicht und Terminologie, die in einem Triangulierungsprozess verwendet werden, um den Schnittbereich der Lichtschicht und des Lichtstreifens zu berechnen;
- [0036] [Fig. 14](#) einen Satz gemessener Datenpunkte eines offenen Buchs, die mit dem Dokumentabtastsystem erzeugt werden;
- [0037] [Fig. 15](#) das Profil einer Oberfläche, die mit einer bikubischen Nut an die gemessenen Punkte angepasst ist, gemäß eines Verfahrens des Stands der Technik zum Entwölben einer Kräuselung;
- [0038] [Fig. 16](#) die Ergebnisse des Stands der Technik eines Entrollens der bikubischen Nut auf eine Ebene;
- [0039] [Fig. 17](#) ein schematisches Diagramm eines Orthobildverfahrens des Stands der Technik zum Entwölben einer Kräuselung, wenn es auf die angepasste Oberfläche angewendet wird;
- [0040] [Fig. 18](#) ein schematisches Diagramm eines dreieckigen Netzes, das verwendet wird, um einer entwickelbaren Oberfläche nahezukommen;
- [0041] [Fig. 19](#) ein schematisches Diagramm einer Möglichkeit zum Schätzen der ungefähren Erstreckung eines gewellten Dokuments, wenn dasselbe entwölbt ist, aus den gemessenen Punkten;
- [0042] [Fig. 20A](#), [Fig. 20B](#) und [Fig. 20C](#) in einer zweidimensionalen Analogie, wie das Netz anfänglich in einem Prozess, der das Netz streckt, so dass es nicht länger entwickelbar ist, an die gemessenen Punkte angepasst wird;
- [0043] [Fig. 21](#) ein schematisches Diagramm, das durch Analogie mit einem Federnetz zeigt, wie das Netz in einen entwickelbaren Zustand zurück gelockert wird, in dem es optimal an die gemessenen Punkte angepasst ist; und
- [0044] [Fig. 22](#) einen Prozess eines Texturabbildens des gelockerten Netzes, um das gewellte Bild des Dokuments zu entwölben.
- [0045] [Fig. 1](#) zeigt ein Dokumentabbildungssystem **1**, das eine elektronische Kamera **2** aufweist, von der ein unterer Abschnitt einen Lichtstreifenprojektor **4** beherbergt, der durch Lasiris, Inc., St. Laurent, Quebec, Canada, als Modell Nr. 515L hergestellt ist. Die Kamera **2** ist oben auf einem Träger **6** angebracht, der an eine Kante **10** einer Arbeitsoberfläche **12** geklemmt **8** ist und sich über dieselbe erhebt. Die Kamera **2** weist eine Hauptlinse **14** mit einer optischen Achse **16** auf, die auf der Arbeitsoberfläche **12** quer und nach unten gerichtet ist. Die Linse **14** weist ein Sichtfeld **18** auf, das einen Bereich **20** der Arbeitsoberfläche **12** auf ein zweidimensionales CCD-Detektorarray **22** in der Kamera **2** abbildet.
- [0046] Das Detektorarray ist mit einer Prozessoreinheit **25** verbunden **23**, die beispielsweise ein Personalcomputer mit einer Erweiterungskarte zum Steuern der Kamera **2**, des Lichtstreifenprojektors **4** und zum Empfangen und Verarbeiten von von dem Detektorarray **22** empfangenen Daten sein kann.
- [0047] Im Idealfall weist der Bereich **20** zumindest die Größe eines A4-Dokuments auf. In ähnlicher Weise weist der Lichtstreifenprojektor **4** eine Projektionslinse **24** auf, die ein strukturiertes Lichtmuster **26** auf einen Arbeitsflächenbereich **28** abbildet, der grob mit dem abgebildeten Bereich **20** zusammenfällt. Das strukturierte Lichtmuster ist nachfolgend ausführlicher beschrieben, erstreckt sich jedoch um eine zentrale Achse **29** herum, die auf der Arbeitsoberfläche **12** grob mit der Kameralinsenachse **16** zusammenfällt. Die Spreizung des strukturierten Lichtmusters reicht aus, um einen Bereich der Größe A4 in einer Entfernung von etwa 300 mm abzudecken.
- [0048] Ein Dokument **30** wurde in den Bereich **20**, **28**, der durch die Kameralinse **14** und das strukturierte Lichtmuster **26** definiert ist, platziert. Das Dokument wird von der Arbeitsoberfläche **12** in einer im Allgemeinen horizontalen Orientierung getragen, ist jedoch geringfügig gewellt. Ein durch das Detektorarray **22** erfasstes Bild weist daher aufgrund des schiefen Winkels zwischen der optischen Achse **16** der Kamera und dem Doku-

ment **30** eine Perspektivenverkürzung sowie aufgrund der Dokumentkräuselung eine Wölbungsverzerrung auf.

[0049] Eine derartige Wölbungsverzerrung ist in [Fig. 2](#) zu sehen, die ein Bild **31** eines offenen Buchs **32** veranschaulicht, wie es durch die Kamera **2** auf dem Detektorarray **22** gebildet ist. Der Betrag an Wölbungsverzerrung ist in der Nähe des Buchrückens **34** am größten.

[0050] [Fig. 3](#) zeigt ein Bild **33** des offenen Buchs **32**, wenn das strukturierte Lichtmuster **26** auf das Buch **32** projiziert wird, um **15** getrennte Lichtstreifen **35** über dem Buch **32** zu erzeugen. Das Buch ist so orientiert, dass die Lichtstreifen **35** quer zu dem Buchrücken **34** sind.

[0051] Es kann dann eine Differenz zwischen dem Bild **33** mit dem Lichtstreifenmuster **35** und demselben Bild **31** ohne das Lichtstreifenmuster **35** genommen werden, um die Lichtstreifen zu erfassen.

[0052] Wie aus den [Fig. 1](#) und [Fig. 3](#) ersichtlich ist, liegt der Vorteil dessen, dass der Lichtstreifenprojektor zusammen mit der Kamera und unterhalb derselben angebracht ist, darin, dass der am weitesten entfernte Streifen **36** stets im Sichtbereich der Kamera liegt, selbst wenn der Streifen über die entferntere Kante eines Buchs hinaus projiziert ist.

[0053] [Fig. 4](#) zeigt, wie das strukturierte Lichtmuster **26** erzeugt wird. Ein Laser **38** mit festen 7 mW projiziert einen Lichtstrahl **40** auf ein erstes optisches Beugungselement **42**, das den Strahl **40** in einen vertikal orientierten Streifen **44** beugt. Der vertikale Streifen **44** wird dann durch ein zweites optisches Beugungselement **46** in das strukturierte Lichtmuster **26** gebeugt, das aus 15 divergierenden, getrennten und sich nicht schneidenden Lichtschichten **48** besteht.

[0054] Das strukturierte Lichtmuster **26** wird auf das Dokument **30** projiziert, wobei die Projektionsachse **29** in einem Winkel **50** versetzt ist, um eine Triangulierung der Lichtstreifen **35** zuzulassen, um eine Dokumentkräuselung zu charakterisieren.

[0055] Diese Beugungselemente **42**, **44** erzeugen einen Satz von sieben konischen Lichtschichten **51**, **53** auf beiden Seiten einer mittigen planaren Lichtschicht **52**. Die mittige planare Lichtschicht **52** enthält einen Zentralstrahl **49**, der auch auf der Lichtstreifenprojektorachse **29** liegt.

[0056] Jeder Satz von Lichtschichten **51**, **53** beugt sich konkav nach innen auf die mittige planare Lichtschicht **52** zu, mit dem Ergebnis, dass die Divergenz zwischen benachbarten Lichtschichten an der Mitte der Lichtschichten **48** minimal ist. Die Schichten liegen symmetrisch um eine Ebene herum, die quer zu der planaren Schicht ist und einen Zentralstrahl der planaren Schicht **52** aufweist.

[0057] Wie es in [Fig. 5](#) gezeigt ist, erzeugen die konischen Lichtschichten **51**, **53** im Allgemeinen gekrümmte, nicht parallele Lichtstreifen auf dem Dokument, mit einer Konzentration von Lichtstreifen entlang einer Linie, die mittig quer zu den Lichtstreifen **35** verläuft. Die Konzentration von Streifen entspricht der minimalen Divergenz zwischen benachbarten Lichtschichten. In [Fig. 3](#) liegt diese Konzentration um den Buchrücken **34** herum. Bei diesem Beispiel stellt die Konzentration von Lichtstreifen um den Buchrücken **34** herum verbesserte Kräuselungsinformationen in der Region der größten Dokumentkräuselung bereit.

[0058] Eine Triangulierung konischer Lichtschichten ist jedoch kein unerhebliches Problem. Aus diesem Grund ist nachfolgend eine geschlossene Lösung für dieses Triangulierungsproblem beschrieben, die im Allgemeinen mit dieser Art strukturierten Lichts angewendet werden kann, um eine Dokumentkräuselung zu charakterisieren. Die geschlossene Form der Triangulierung erlaubt auch die Verwendung eines Standardoptimierungsverfahrens zum Durchführen einer Anfangskalibrierung des Systems aus der Kamera **2** und dem Lichtstreifenprojektor **4**.

[0059] Auch wenn die Verwendung eines strukturierten Lichtmusters mit einer Vielzahl von Linien in Bezug auf die Kosten, die erforderliche Zeit zum Erfassen eines Bilds und die mechanische Komplexität Vorteile gegenüber herkömmlichen Laserabtastverfahren aufweist, nämlich in dem Sinn, dass es keine sich bewegenden Teile, wie beispielsweise Galvanometer oder Schrittmotoren, gibt, besteht ein Nachteil darin, dass die dreidimensionale Auflösung geringer ist, da sie auf die Anzahl von Linien in eine Richtung beschränkt ist. Dieser Nachteil wird durch die Konzentration von Linien in der Region der größten Kräuselung und, wie es nachfolgend erläutert ist, durch die Verwendung neuartiger Verfahren zum Charakterisieren und Entwölben von Bildkräuselung teilweise gelindert.

[0060] Eine Triangulierung funktioniert wie folgt. Zuerst werden Lichtstreifen **48** auf ein Objekt projiziert, das durch die Kamerabildebene an dem Detektorarray **28** betrachtet und auf dieselbe projiziert wird. Man nehme für einen Moment einmal an, dass der Laser lediglich eine einzige Lichtschicht einer bekannten Form und durch eine entsprechende bekannte Gleichung in dem Kamerareferenzsystem definiert projiziert, die, wenn sie auf ein Objekt geworfen wird und durch die Kamera abgebildet wird, eine einzelne Krümmung (oder einen einzelnen Streifen) auf der Bildebene erzeugt. Ein gegebener Punkt des Streifens definiert eine Linie im Raum, die von der optischen Achse der Kamera durch das Bild hindurch geht. Der Schnittbereich zwischen der Lichtschicht und dieser Linie definiert einen dreidimensionalen Punkt in dem Kamerareferenzsystem, der sich auf der Oberfläche des Objekts befindet. Durch Wiederholen der Prozedur für jeden Streifenpunkt kann man nun wirksam sämtliche Punkte des Objekts regenerieren, die auf der durch den Schnittbereich der projizierten Lichtschicht und der Objektoberfläche gebildeten Krümmung liegen.

[0061] Bei dieser Erfindung wird jedoch statt einer einzelnen Lichtschicht ein Satz derselben verwendet, die geringfügig verlagert sind, um einen größeren Abschnitt des Objekts abzudecken und somit einen dreidimensionalen Schnappschuss desselben zu erhalten. In dem Fall der einzelnen Lichtschicht war bekannt, dass ein beliebiger Bildstreifenpunkt der Projektion eines 3D-Punkts eines bekannten Streifens entsprach, und aus diesem Grund ist es möglich, eine Triangulierung eindeutig durchzuführen. Im Gegensatz dazu ist in dem Fall mit der Vielzahl von Lichtschichten nicht wirklich bekannt, welche bestimmte Lichtschicht diese Projektion erzeugt hat, weshalb irgendeine Form einer Streifenkennzeichnung oder -identifizierung erforderlich ist, um zu bestimmen, welcher Bildstreifen durch eine bestimmte Lichtschicht erzeugt worden ist.

[0062] Das System aus der Kamera **2** und dem Lichtstreifengenerator **4** wird anfänglich durch Messen einer Referenzoberfläche kalibriert, die der Einfachheit halber eine Tragefläche **12** sein kann. Die vertikale Verlagerung zwischen der unverzerrten Projektion auf der Referenzoberfläche und der verzerrten Projektion auf dem gewellten Dokument ist eine eindeutige Funktion einer Tiefe oder Höhe des gewellten Dokuments bezüglich der Referenzoberfläche.

[0063] Der beugende Lichtstreifenprojektor **4** erzeugt ein strukturiertes Lichtmuster mit Streifen **48**, von denen jeder eine periodische Intensitätsabweichung entlang seiner Länge aufweist. In erster Näherung treten die Spitzen in der Lichtintensität des strukturierten Lichtmusters somit an Punkten auf, die auf einer kugelförmigen Oberfläche, die auf dem Lichtstreifenprojektor zentriert ist, durch die folgenden Gleichungen dargestellt sein können:

$$x_{i,j} = i\lambda \frac{D}{\Lambda_1 N_{i,j}} \quad \text{und} \quad y_{i,j} = j\lambda \frac{D}{\Lambda_2 N_{i,j}} \quad \text{wobei}$$

$$N_{i,j} = \left[1 - \left(i \frac{\lambda}{\Lambda_1} \right)^2 - \left(j \frac{\lambda}{\Lambda_2} \right)^2 \right] \quad (1)$$

und wobei $(x, y) = (0, 0)$ auf der Projektionsachse **29** liegt, D die Entfernung von dem Lichtstreifenprojektor **4** ist, λ die Laserwellenlänge ist, Λ_1 die Periode des Gitters für das Beugungselement **42** ist und Λ_2 die Periode des Gitters für das Beugungselement **46** ist.

[0064] [Fig. 5](#) zeigt 15 Lichtstreifen, die durch den Schnitt einer Ebene, die 0,5 m von dem Lichtstreifenprojektor beabstandet ist und sich im rechten Winkel zu der Lichtschichtprojektionsachse **29** befindet, gebildet sind. Die mittige planare Lichtschicht **52** erzeugt einen geradlinigen Lichtstreifen **54**, und die Lichtstreifen **55,57** an beiden Seiten des mittigen Lichtstreifens **54** biegen sich nach innen zu dem mittigen Lichtstreifen **54** hin. Die Lichtstreifen sind somit entlang einer Mittellinie **56** quer zu dem mittigen Streifen **54** konzentriert.

[0065] Um eine Triangulierung geschlossen an dem projizierten Lichtstreifenmuster durchzuführen, ist es erforderlich, dieses Muster und somit jede Lichtschicht **48** in mathematischer Form auszudrücken. Es werden deshalb fünf Punkte **58** verwendet, die Hilfsmaxima entlang jedem Lichtstreifen **50** entsprechen, wie es in [Fig. 6](#) gezeigt ist, um ein Polynom zweiter Ordnung T des projizierten Streifens auf der orthogonalen Ebene in einer gegebenen Entfernung zu erzeugen. Auch wenn der Streifen genau genommen nicht quadratisch ist, fällt auf, dass die Abweichung von den Daten geringer als 0,01 ist, wenn das Polynom zweiter Ordnung ist. Die Gleichung des Polynoms Γ kann in parametrischer Form wie folgt ausgedrückt werden:

$$\Gamma_N : \begin{cases} x_{\Gamma,N} = u \\ y_{\Gamma,N} = b_N + a_N u^2 \\ z_{\Gamma,N} = c_N \end{cases}$$

wobei der Index N für die Streifennummer steht und u ein freier Parameter ist, der graphisch in [Fig. 7](#) veranschaulicht ist. Hieraus lässt sich nun ein Kegel **70** bilden, der auf der Projektionsachse **29** zentriert ist, indem man v einen Parameter sein lässt, der die Kegellänge überstreicht. Der Kegel **70** ist wie folgt ausgedrückt:

$$\Sigma_N : \begin{cases} x_{\Sigma,N} = v x_{\Gamma,N} = v u \\ y_{\Sigma,N} = v y_{\Gamma,N} = v (b_N + a_N u^2) \\ x_{\Sigma,N} = v z_{\Gamma,N} = v c_N \end{cases} \quad (2)$$

[0066] Wie es nachfolgend beschrieben ist, ist besonders die algebraische Form jedes Lichtkegels interessant, die durch die folgende Elimination erhalten wird:

$$\Sigma_N : yz - z^2 \frac{b_N}{c_N} - a_N c_N x^2 = 0$$

[0067] Um eine geschlossene Triangulierung durchzuführen, ist es erforderlich, auch die relative Orientierung der Kameralinsenachse **16** und der Lichtstreifenprojektorachse **29**, die hierin als die Roto-Translation R_{OL} zwischen der Kamera **2** und dem Lichtstreifenprojektor **4** bezeichnet ist, zu kennen.

[0068] Das bei dieser Erfindung eingesetzte intrinsische Kameramodell wird durch einen herkömmlichen Satz von fünf Parametern beschrieben, die die Brennweite f, die Anzahl von Pixeln pro Meter in der horizontalen und vertikalen Richtung α_x und α_y , der „durchdringende Punkt“ (x_0, y_0) (von dem angenommen wird, dass er sich in der Mitte des Bilds befindet) plus der Radialverzerrungsparameter K sind.

[0069] Die Kalibrierung der Kameraparameter f, α_x und α_y , des „durchdringenden Punkts“ (x_0, y_0) kann durch ein Verfahren geschätzt werden, das durch Tsai, R. Y., IEEE Transactions on Robotics and Automation, Nr. 4, S. 323–344, 1987, beschrieben ist.

[0070] Die Schätzung der Roto-Translation R_{OL} wird durch ein kundenspezifisches Verfahren erreicht, das auf einem Optimierungsprozess basiert, der mit dem Erfassen spärlicher dreidimensionaler Daten eines planaren Objekts beginnt. Ein anfänglicher grober Schätzwert von R_{OL} wird anschließend bestimmt. Daraufhin wird ein in [Fig. 8](#) gezeigter iterativer Prozess verwendet, um sechs R_{OL} repräsentierende Parameter (drei Eulersche Drehwinkel und drei Translationen) einzustellen, bis triangulierte Datenpunkte effektiv planar werden. Durch eine Implementierung des Levenberg-Marquard-Verfahrens wird eine Minimierung von Fehlern durchgeführt.

[0071] [Fig. 9A](#) und [Fig. 9B](#) zeigen zwei Graphen, die die Fehler beim Messen einer planaren Oberfläche unter Verwendung des anfänglichen groben Schätzwerts von R_{OL} veranschaulichen. [Fig. 10A](#) und [Fig. 10B](#) zeigen zwei ähnliche Graphen unter Verwendung der endgültigen geschätzten R_{OL} nach dem Optimierungsprozess der [Fig. 8](#). Diese Graphen zeigen, dass die Verringerung bei der Normabweichung des Fehlers bei der Messung der Ebene von 20 mm auf weniger als 1 mm verringert wird. Der Restfehler ist auf Messrauschen zurückzuführen.

[0072] Eine Korrektur der radialen Verzerrung wird auf dem Gebiet des Dokumentabbildens in der Regel vernachlässigt. Es wurde jedoch erkannt, dass diese Korrektur wichtig ist, um ausreichend genaue Ergebnisse zu erhalten. Die Abbildung von verzerrten auf unverzerrte Koordinaten ist wie folgt:

$$\begin{cases} \bar{x} = x + x K_1 d^2 \\ \bar{y} = y + y K_1 d^2 \end{cases} \quad d = \sqrt{(x - c_x)^2 + (y - c_y)^2}$$

[0073] Zur Vereinfachung der Darstellung werden diese neuen Koordinaten in der nachfolgenden Beschreibung als die tatsächlichen Bildkoordinaten behandelt, obwohl berücksichtigt werden muss, dass dieselben korrigierte Koordinaten sind, die aus der im Vorhergehenden gezeigten Abbildung abgeleitet sind.

[0074] Die bei dem vorliegenden Beispiel verwendete Kamera **2** weist einen Radialverzerrungsparameter K

= 0,004 Pixel/mm² auf. [Fig. 11A](#) zeigt, wie, selbst wenn R_{OL} kalibriert worden ist, der Fehler sehr groß wird, wenn die radiale Verzerrung nicht berücksichtigt wird. Sobald diese Verzerrung berücksichtigt wird, ist die Verzerrung so wie in [Fig. 11B](#) gezeigt.

[0075] Da mehr als ein Lichtstreifen vorhanden ist, ist es erforderlich, jeden erfassten Lichtstreifen zu identifizieren, bevor eine Triangulierung durchgeführt wird. Bei diesem Verfahren gibt es zwei eindeutige Teile, wobei der erste eine Streifenerfassung und der zweite eine Streifenkennzeichnung ist.

[0076] Die dreidimensionale Dokumentbilderfassung kann durch kurzes Aufleuchten des Lasermusters und synchrones Erfassen des Dokumentbilds einschließlich des Lichtstreifenmusters mit dem Detektorarray **22** durchgeführt werden, wie es in [Fig. 3](#) gezeigt ist. Entweder davor oder danach wird das Dokument ohne das Lichtstreifenmuster abgebildet ist, wie es in [Fig. 2](#) gezeigt ist. Es gibt dann zwei überlappende Bilder, eines mit dem Muster und eines ohne dasselbe, womit es dann einfach ist, eine Bilddifferenzierung zu verwenden, um zu erreichen, dass die Streifen hervorstechen.

[0077] Jedoch ist der Intensitätswert über die Streifen hinweg im Allgemeinen unausgeglichen, beispielsweise aufgrund von Hilfsspitzen, wie in der Gleichung (1) oben, oder aufgrund unausgeglichener Umgebungsbeleuchtung oder eines Reflexionsvermögens von Papier. Es wird also das Bild der Lichter verarbeitet. In Anbetracht der vorherrschend horizontalen Linien ist der erste Schritt eine Verwendung eines eindimensionalen Laplaceschen Operators (zweite Ableitung), der lediglich auf der y-Richtung (vertikalen Richtung) angelegt wird. Die Anwendung dieses Operators verleiht der Mitte des Streifens einen hohen negativen Wert. Dieser Wert kann dann einer Schwellenbewertung unterzogen werden, um ein binäres Bild zu erhalten. Der Prozess ist robust und schnell, jedoch kann die Verwendung eines einzigen Schwellenwerts unvermeidlich einige Lücken in der Kontinuität der erfassten Streifen erzeugen, wie es in [Fig. 12](#) gezeigt ist.

[0078] Das Verfahren, das verwendet wird, um Lichtstreifen zu identifizieren, ist wie folgt. Als erstes werden die Streifen in ihrer Dicke bis auf eine Dicke von einem Pixel verringert, und verbundene Pixel werden zu einer Kette zusammengefügt. Als nächstes werden Ketten, die zu kurz sind, aus der Klassifizierung als vermeintliches Rauschen entfernt. Das Ergebnis ist ein Datensatz von Pixeln wie in [Fig. 12](#) gezeigt, wobei Kettensegmente **80** mit Lücken **82** durchsetzt sind.

[0079] Anschließend wird für jede Kette ein heuristisches "Stärke"-Maß wie folgt berechnet:
 $S = 0,5 \cdot \text{Länge} + 0,5 \cdot \text{Abs (Durchschn. (Obere 30\% des Laplaceschen Werts))}$

[0080] Dies ist eine gleichmäßig gewichtete Summe der Länge und des Durchschnitts des oberen Drittels des Absolutwerts der Laplaceschen Werte. Es werden nicht alle Laplaceschen Werte entlang einer Kette gemittelt, da die Streifenintensität nicht gleichmäßig verteilt ist und einige schwache Abschnitte sich negativ auf den Durchschnitt auswirken können.

[0081] Als nächstes werden für jede Spalte von Pixeln und beginnend von der obersten Zeile von Pixeln des Bilds ausschließlich den stärksten Streifenpunkten im Sinne der vorherigen Erläuterungen aufeinander folgende, größer werdende Kennzeichnungsnummern zugeordnet. Die Nummerierung von Streifen endet mit der höchsten zu erwartenden Nummer, in diesem Fall **15**. Schließlich wird jeder Kette eine Kennzeichnung gleich der allen Punkten dieser Kette am häufigsten zugeordneten Kennzeichnung zugeordnet. [Fig. 12](#) zeigt das Kennzeichnungsergebnis, bei dem alle Streifen korrekt gekennzeichnet sind.

[0082] Dieser Ansatz, der im Wesentlichen ein Wahlverfahren ist, ist sehr robust in allgemeinen Situationen und kann problemlos mit Lücken umgehen. Er läuft auch relativ schnell auf kostengünstiger Hardware. Er hat den Vorteil, dass die Lichtstreifen individuell unterscheidbar sind, wobei einzelne Streifen durch Zählen der Reihe von Streifen gekennzeichnet sind.

[0083] Es gibt Situationen, in denen das Verfahren darin fehlschlägt, Streifen ordnungsgemäß zu kennzeichnen, nämlich wenn die Annahmen, auf denen es basiert, nicht erfüllt werden. Wenn beispielsweise ein Streifen vollständig oder größtenteils unsichtbar oder durch beispielsweise eine dicke Buchkante verborgen ist, wird die Kennzeichenzuordnung bedeutungslos. Deshalb werden bei einem alternativen Ausführungsbeispiel, das in den Zeichnungen nicht veranschaulicht ist, die Lichtstreifen durch räumliche Modulation individuell unterscheidbar gemacht.

[0084] Trotzdem sind dies Situationen, die in der Praxis nicht auftreten sollten, wenn der Lichtstreifenprojektor bezüglich der Kamera ordnungsgemäß angeordnet ist, wenn er z. B. an derselben Seite des Dokuments wie

die Kamera und unterhalb des Niveaus der Kamera angebracht ist.

[0085] Die vorgeschlagenen Ansätze zum Kennzeichnen von Streifen sind schnell und einfach verglichen mit anderen Ansätzen, in denen die Streifen vorübergehend moduliert oder auf andere Weise, z. B. durch Farbcodieren, individuell unterscheidbar gemacht werden.

[0086] Dreidimensionale Datenpunkte können dann über eine Triangulierung erhalten werden, die, wie es in [Fig. 13](#) veranschaulicht ist, aus einem Finden des Schnittbereichs zwischen der Lichtschicht **48** und einem optischen Strahl, der durch einen gegebenen Punkt **86** auf dem projizierten Streifen **88** und einen entsprechenden Punkt **90** auf dem erfassten Bild **92** in der Detektorebene **94** hindurch geht **84**, besteht.

[0087] Bezug nehmend auf [Fig. 13](#) sei ${}^0P = (X, Y, Z)$ ein dreidimensionaler Punkt in dem Kamerareferenzsystem O , ${}^0p = (x, y)$ sei ein Streifenpunkt in der Bildebene, ${}^1\Sigma$ sei die konische Oberfläche, die die konische Lichtschicht **48** in dem Lichtstreifenprojektorreferenzsystem L darstellt, und R_{OL} sei die Transformation zwischen den zwei Referenzsystemen, ausgedrückt durch die Vier-mal-Vier-Matrix:

$$R_{OL} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

das Problem bei der Triangulierung ist es, den Schnittbereich zwischen einem allgemeinen elliptischen Kegel und einer Linie im Raum zu finden. Zuerst wird der Kegel über R_{OL} auf das Referenzsystem der Kamera transformiert, indem ein Kegelpunkt in Form eines in dem O -Referenzsystem als zu L transformierten Punkts dargestellt wird:

$${}^0\Sigma : \left\{ \begin{array}{l} \left\{ {}^L\Sigma : {}^L y {}^L z - {}^L z^2 \cdot \frac{b_N}{c_N} - a_N c_N {}^L x^2 = 0 \right\} \\ \leftarrow \left\{ \begin{array}{l} {}^L x = n_x {}^0 x + o_x {}^0 y + a_x {}^0 z + p_x \\ {}^L y = n_y {}^0 x + o_y {}^0 y + a_y {}^0 z + p_y \\ {}^L z = n_z {}^0 x + o_z {}^0 y + a_z {}^0 z + p_z \end{array} \right\} \end{array} \right\}$$

[0088] Die parametrische Form des optischen Strahls ist:

$${}^0x = tx_i$$

$${}^0y = ty_i$$

$${}^0z = tf$$

wobei f die Brennweite ist und x und y in Bildkoordinaten ausgedrückt sind. Es wird dann ein System niedergeschrieben, das den Schnittbereich zwischen diesem Kegel und dem optischen Strahl ausdrückt:

$$\begin{cases} {}^0\Sigma : f({}^0x, {}^0y, {}^0z) = 0 \\ {}^0x = tx_i \\ {}^0y = ty_i \\ {}^0z = tf \end{cases}$$

[0089] Durch einfache Ersetzung gelangt man zu einer Gleichung zweiter Ordnung bei dem Parameter des optischen Strahls t :

$$At^2 + Bt + C = 0 \rightarrow [t_1, t_2]$$

deren Lösungen t_1 und t_2 die zwei Schnittpunkte des Strahls mit dem Kegel darstellen. Diese Gleichung kann analytisch gelöst werden, und die relativ verzwickte Lösung wurde gefunden, ist jedoch hier aus Gründen der Übersichtlichkeit hier weg gelassen.

[0090] Lediglich einer der im Vorhergehenden erwähnten Schnittpunkte ist von Interesse, und zwar der, der sich aufgrund der Art, auf die der Kegel aufgebaut ist, als derjenige herausstellt, der dem kleinsten Parameter u entspricht, der die Hälfte des Kegels überspannt, die näher zu der Z-Achse des Referenzsystems L ist.

[0091] Somit werden beide Lösungen zu dem Lichtstreifenprojektorreferenzsystem L zurück transformiert:

$${}^L P_{\lambda} = \begin{bmatrix} {}^L X_{\lambda} / w \\ {}^L Y_{\lambda} / w \\ {}^L Z_{\lambda} / w \\ 1 \end{bmatrix} = R_{OL}^{-1} \begin{bmatrix} t_{\lambda} x_i \\ t_{\lambda} y_i \\ t_{\lambda} f \\ 1 \end{bmatrix}$$

und die zweite der Gleichungen 2 verwendet, um die zwei entsprechenden u 's zurück zu gewinnen, d. h.:

$$\bar{t} = \left\{ t_{\lambda} \text{ derart, dass } \lambda = \arg \min_{\lambda} \left(u_{\lambda} = \frac{{}^L X_{\lambda} C_N}{{}^L Z_{\lambda}} \right), \lambda = 1, 2 \right\}$$

[0092] Schließlich ist der dreidimensionale Schnittbereich gegeben durch:

$$X = \bar{t} x_i$$

$$Y = \bar{t} y_i$$

$$Z = \bar{t} f$$

[0093] Die Koordinaten des Punkts im Raum, der zu dem Schnittbereich der Lichtschicht mit dem Objekt gehört, und dessen Projektion ein bestimmtes Streifenpixel in dem Bild ist, sind somit gefunden.

[0094] Dieser Prozess muss für jedes Pixel (und optional mit Teilpixelauflösung) für jeden der 15 Streifen wiederholt werden. Der Triangulierungsprozess ist sehr schnell, wenn es jedoch erforderlich ist, wäre es möglich, entlang jeder Linie teilabzutasten. Das Ergebnis ist eine „Wolke“ dreidimensionaler Datenpunkte wie die in [Fig. 14](#) gezeigt.

[0095] Man verfügt nun über eine Wolke dreidimensionaler Datenpunkte **95**, die die Paperoberfläche darstellen. Das Problem ist, wie diese Punkte **95** nun zu verwenden sind, um die Kräuselungsverzerrung zu entfernen oder zu „entwölben“.

[0096] Es ist im Allgemeinen schwierig, ein Bild eines gewellten Dokuments zu entwölben. Das Hauptproblem ist, dass Papier keine generische Oberfläche sondern eine „entwickelbare“ Oberfläche ist, d. h. eine, die ohne sie zu reißen oder zu dehnen auf eine Ebene entfaltet werden kann. Die Gaußsche Krümmung K einer entwickelbaren Oberfläche $S(u, v)$ ist überall Null, d. h. $K(u, v) = 0$.

[0097] Der herkömmliche Ansatz zur Wiederherstellung einer Oberfläche mit Anpassen und Festlegen einer Oberfläche, möglicherweise mit einigen Unterbrechungen, lässt sich auf unser Problem nicht anwenden, da wir nicht nur rekonstruieren müssen, sondern auch diese Oberfläche auf eine Ebene entfalten müssen. Dies ist nicht möglich, wenn die rekonstruierte Oberfläche nicht zuerst einmal entwickelbar ist. Es ist somit erforderlich, die angepasste Oberfläche so weit zu beschränken, dass sie entwickelbar ist, d. h. überall eine Gaußsche Krümmung von Null aufweist, was kein einfaches Vorgehen ist.

[0098] [Fig. 15](#) und [Fig. 16](#) veranschaulichen, warum ein einfacher Ansatz im Allgemeinen nicht funktioniert. Die dreidimensionalen Daten der [Fig. 14](#) wurden geglättet, und eine bikubische Nutoberfläche **96** wurde angepasst. Im Idealfall, in dem Daten kein Rauschen aufweisen und das System aus Lichtstreifenprojektor und Kamera fehlerfrei kalibriert ist, sollte auch eine angepasste Oberfläche entwickelbar sein, in der Realität ist es jedoch so, dass dies auf die erhaltene Oberfläche keinesfalls zutrifft. Man beachte beispielsweise die kleinen Höcker an manchen Stellen **98**.

[0099] Wird die Seite nun entkräuselt, müssen Stücke aus dem Originalbild auf Stücke einer Ebene texturabbildet werden, was ein Abbilden ist, das durch Integration endlicher Differenzen bei der Netzoberfläche **96** berechnet wird, wie es in [Fig. 16](#) gezeigt ist.

[0100] Per Definition kann jedoch eine nicht entwickelbare Oberfläche lediglich durch entweder Reißen oder Dehnen auf eine Ebene entrollt werden, was unnatürliche Verzerrungen bei dem entrollten Dokument **100** verursacht. Dies liegt in dem integrativen Charakter eines Entrollens einer Oberfläche begründet, wo örtlich kleine Fehler die Neigung aufweisen, sich aufzubauen und zu unansehnlichen Verzerrungen zu führen. [Fig. 16](#) zeigt die Verzerrung bei der Textur, die durch die Unregelmäßigkeiten bei der entfernten Seite des rekonstruierten planaren Netzes in [Fig. 15](#) verursacht ist.

[0101] Es kann also das Problem des Entrollens der Seite zu einem Problem eines Anpassens einer entwickelbaren Oberfläche auf rauschhafte Daten umformuliert werden.

[0102] ein zweites Problem ist, dass die Lichtstreifen nicht die gesamte Seite abdecken oder dass Lücken direkt in der Nähe der Kanten der Seite/des Buchs vorliegen. In diesem Fall stehen keine dreidimensionalen Daten zur Verfügung, und es gibt keine Kenntnisse für ein Entrollen dieser Regionen.

[0103] Kurz gesagt verwendet das Verfahren, das mit der vorliegenden Erfindung eingesetzt wird, ein Endliches-Element-Modell, das als ein dreieckiges Netz dargestellt ist, das sich gleichzeitig an die Daten anpasst und die Daten beschränkt, um durch einen Lockerungsprozess isometrisch bezüglich einer Ebene (d. h. entwickelbar) zu sein.

[0104] Zuerst wird das Problem in zwei Dimensionen betrachtet, wie es in [Fig. 19](#) veranschaulicht ist. Es gibt hier einen Satz von Datenpunkten **102**, der hierin als ein „erster Satz von Punkten“ bezeichnet ist, der rauschhafte Messungen einer Krümmung entlang ihrer Länge darstellt. Ein weiterer Satz von Punkten **104**, der hierin als ein „zweiter Satz von Punkten“ bezeichnet wird, kann dann mittels einer Anpassung mit Hilfe der Fehlerquadratmethode an den ersten Satz **102** angepasst werden. Durch Durchlaufen des zweiten Satzes von Punkten **104** kann eine verbundene stückweise lineare Krümmung **106** konstruiert werden. Der zweite Satz von Punkten **104** kann stets in eine Linie **108** „rückgängig gemacht“ werden, da die lineare Krümmung isometrisch zu einer Linie ist. Diese Eigenschaft erklärt, warum viele Methoden, die das Ziel haben, die Seitenkräuselung von Büchern zu entfernen, ein eindimensionales Modell der Kräuselung verwenden und gute Ergebnisse erzielen, wenn die Dokumentenkräuselung im Wesentlichen zylindrisch ist. Bei einem allgemeinen dreidimensionalen Fall ist es jedoch nicht möglich, einen zweidimensionalen Satz von Punkten, der ein gewelltes Dokument darstellt, einfach zu entfalten, und zwar aufgrund von Rauschen oder anderen Ungenauigkeiten bei den Punkten.

[0105] Es gibt eine alte in der Kartographie verwendete Technik, die als Ortho-Bild-Projektion bezeichnet wird. Das Verfahren korrigiert im Wesentlichen nicht eine Seitenkräuselung, sondern projiziert einfach die Textur orthographisch auf eine Ebene. Auch wenn es einfach und nicht anfällig für lokale Verzerrungen ist, ist dieses Verfahren grundsätzlich fehlerbehaftet, da es das Dokument nicht entfaltet, sondern es eher lediglich „nach unten drückt“.

[0106] Blattartige Dokumente und Papier können sich nicht beliebig verformen. Dieselben deformieren sich eher so, dass Bogenlängen zwischen beliebigen Punkten auf der Oberfläche erhalten bleiben. Es kann also behauptet werden, dass sich die Oberfläche isometrisch verformt und mathematisch durch eine Entwickelbare ausgedrückt sein kann. Die Erfindung benutzt derartige Oberflächen als ein generisches Modell zur Dokumentdeformierung, bei dem an spärliche, jedoch verteilte, 3D-Daten eine entwickelbare Oberfläche angepasst wird, die dann geeignet entrollt, d. h. texturabbildet, wird, um ein berichtigtes Bild des Dokuments zu erzeugen. Durch Anwenden eines physikalischen und selbstkonsistenten Papiermodells ist die Beseitigung von Verzerrung bei der Kräuselungskorrektur ebenfalls gewährleistet.

[0107] Eine Oberfläche wird als eine entwickelbare Oberfläche bezeichnet, wenn ihre Gaußsche Krümmung an jedem Punkt verschwindet. Entwickelbare Oberflächen können ohne Dehnen oder Reißen auf eine Ebene geglättet werden. In ähnlicher Weise ist eine entwickelbare Oberfläche eine, die durch Biegen einer Ebene erhalten wird, wobei mit Biegen eine Transformation gemeint ist, die eine Bogenlänge beibehält.

[0108] Es sei darauf hingewiesen, dass nicht alle Linienoberflächen entwickelbar sind. Entwickelbare Oberflächen sind eine bestimmte Unterklasse von Linienoberflächen, d. h. Oberflächen, die durch eine gerade Linie, die sich im Raum bewegt, erzeugt sind.

[0109] Die analytische Form einer entwickelbaren Oberfläche ist eine parametrische Gleichung einer Linienoberfläche mit der Beschränkung, dass die Tangentialebene entlang jeder Lineatur dieselbe ist. Diese Definition ist per se unpraktikabel und ist hauptsächlich für eine interaktive Modellierung oder Anzeige geeignet.

[0110] Ein Modell endlicher Elemente (FEM; FEM = Finite Element Model) kann verwendet werden, um eine entwickelbare Oberfläche, beispielsweise ein Netz **110**, wie das in [Fig. 18](#) gezeigte, das dreieckige Kacheln **111** aufweist, darzustellen. Ein derartiges Netz kann deformiert **112** werden, um einer entwickelbaren Oberfläche nahezukommen **114**. Wenn das Netz **110** deformiert wird, bleiben die Kacheln **111** unverändert.

[0111] Eine entwickelbare Oberfläche kann mit einem dreieckigen Netz modelliert werden, indem angenommen wird, dass die Längen von Netzkanten **116** zwischen Netzknoten **117** konstant bleiben, wenn das Netz verformt wird. Ein Verfeinern des Netzes kann selbstverständlich jeglichen Näherungsfehler willkürlich klein machen. Es muss jedoch darauf hingewiesen, dass es im Allgemeinen nicht möglich ist, Dreiecke zu spalten und das Netz lokal zu verfeinern, um den Fehler, beispielsweise in Regionen hoher Krümmung, zu reduzieren, sobald das Netz begonnen hat, sich zu verformen.

[0112] Mit einem derartigen verformbaren Drahtrahmennetz können auch Knicke modelliert werden. Durch Erhöhen der Auflösung des Netzes ist es tatsächlich möglich, eine beliebige entwickelbare Oberfläche, und somit auch jedes beliebig verformte Stück Papier, immer genauer zu modellieren.

[0113] Der im Vorhergehenden beschriebene Dokumentkräuselungscharakterisierungsprozess erzeugt im Allgemeinen rauschhafte spärliche Daten, wie es in [Fig. 14](#) gezeigt ist. Unter Umständen ist die Erstreckung der Oberfläche nicht bekannt.

[0114] [Fig. 19](#) zeigt eine Möglichkeit zum Schätzen der Erstreckung der Oberfläche. Eine konvexe Hülle oder ein Rechteck **118** (oder gleichbedeutend ein Quadrat), das den gesamten "ersten Satz von Punkten" **95** umfasst, wird auf die Trageebene **12** projiziert. Ein Rechteck **124** kann dann von Extrempunkten der projizierten Linien **126**, **128** abgeleitet werden. In [Fig. 19](#) passt eine B-Nut die Datenpunkte **95** an und schätzt seine Erstreckung durch Integration entlang einiger gewählter Krümmungen **120**, **122**.

[0115] Alternativ kann das Dokumentabtastsystem es einem Benutzer erlauben, die Größe des Dokuments auszuwählen. Alternativ könnte die Erstreckung unter Verwendung lediglich der bekannten Systemgeometrie, d. h. der Standposition bezüglich Kamera **2**, und der Kamerakalibrierungsparameter direkt aus dem Bild bestimmt werden.

[0116] Dieser letztere Ansatz würde auch dazu beitragen, die Probleme einer Fehlanpassung zu überwinden, die auftreten könnte, da ein Teil der dreidimensionalen Daten **95** nicht zu der selben entwickelbaren Oberfläche gehört. Dies kann der Fall sein, wenn die Daten von einem dicken Buch oder einem kleinen gewellten Dokument stammen und das strukturierte Lichtmuster größer als die Dokumentregion ist. In diesem Fall muss eine Möglichkeit bestehen, festzustellen, was zu dem Dokument gehört und was nicht. Dies könnte durch Analysieren einer generischen Oberfläche stattfinden, die an die Daten angepasst ist, mit einer Suche nach einer steilen Krümmung oder Tiefenveränderungen. Punkte außerhalb solcher plötzlichen Veränderungen könnten dann verworfen werden. Eine andere Möglichkeit wäre es, zuzulassen, dass das Netz während des „Lockerungs“-Prozesses, der nachfolgend beschrieben ist, an allen Stellen, an denen der Prozess nicht konvergiert, bricht.

[0117] Sobald die Erstreckung der Oberfläche **118** und die entsprechende planare Projektion **124** bekannt sind, wird das Netz **110** an den rauschhaften Satz von Punkten **95** angepasst. Der Prozess wird mit Bezug auf [Fig. 20A](#), [Fig. 20B](#) und [Fig. 20C](#) verständlich, die aus Gründen der Übersichtlichkeit einen „Initialisierungs“-Prozess in einer zweidimensionalen Analogie zeigen.

[0118] Zuerst wird eine „Anfangs“-Oberfläche, hier eine Ebene **130**, mit einer Abweichung nach der Fehlerquadratmethode durch den rauschhaften dreidimensionalen Satz von Datenpunkten **95** angepasst. Anschließend wird das planare Netz **110** gedreht und umgesetzt, damit es mit dieser Ebene **130** und der geschätzten Erstreckung **124** der Oberfläche **118** zusammenfällt. Anschließend wird jeder Netzknoten **117** vertikal im rechten Winkel zu der Ebene **130** der Anpassung mit Hilfe der Fehlerquadratmethode zu dem nächst gelegenen Punkt **95** hin vertikal umgesetzt **132**. Liegt innerhalb eines gewissen Radius, der hier als ein Drittel der Entfernung zu dem nächst liegenden benachbarten Knoten **117** angenommen wird, kein Punkt **95** vor, dann wird der Knoten an seinem Platz belassen, wie es bei der [Fig. 20C](#) für einen Knoten **134** der Fall ist. Das Ergebnis ist ein verzerrtes Netz **133**, das durch einen „zweiten Satz von Punkten“ **117** dargestellt ist, der bei diesem Beispiel aus den Netzknoten besteht.

[0119] Auf dieser Stufe ist das Netz **133** nicht mehr entwickelbar, d. h. die Isometrie bezüglich der Ebene **130**, mit der der Prozess begonnen wurde, ist verloren gegangen. Jedoch kommt das Netz **133** nun, wie grob auch

immer, der Oberfläche **118** nahe. Die nächste Stufe ist es, das Netz **113** so einzustellen, dass es wieder entwickelbar ist, und dies wird in einem „Lockerungs“-Prozess erreicht.

[0120] Es wird nun zuerst die zu verwendende Terminologie definiert. $x_i = [x_i \ y_i \ z_i]^T$ sei ein Netzknoten, definiert als ein Vektor von Koordinaten in einem kartesischen System, und $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ sei der Satz von Knoten des Netzes. Auch sei e_{ij} eine Kante des Netzes, die zwei Knoten x_i und x_j verbindet, und

$$E = \{e_{i_1 j_1}, \dots, e_{i_M j_M}\}$$

sei der Satz aller Kanten des Netzes. Das Netz kann dann durch $M = \{X, E\}$ dargestellt sein. Ebenso wird eine Nachbarschaft eines Knotens x_i als der Satz von Knoten $N_i = \{x_j : e_{ij} \in E\}$ definiert.

[0121] Mit

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^T (x_i - x_j)}$$

sei die euklidische Entfernung zwischen zwei Knoten angezeigt, und mit \hat{d}_{ij} die Referenzentfernung, die das Netz in seinem ursprünglichen flachen Zustand besaß.

[0122] Um das Netz in einen entwickelbaren Zustand zu transformieren, wobei nach wie vor den Daten nahegekommen wird, wird ein Optimierungsverfahren verwendet, um die Abweichung des Netzes von dem idealen entwickelbaren Zustand zu minimieren. [Fig. 21](#) veranschaulicht mittels einer mechanischen Analogie ein Netz **140** von Federn **142**. In einem gelockerten Zustand weist das Netz **140** entspannte Federn **142** einer Dehnung \hat{d}_{ij} auf, die an Knoten **144** miteinander verbunden sind. Diese netzartige Struktur **140** weist somit in einem stabilen Zustand, wenn alle Federn die Dehnung c aufweisen, eine minimale Energie auf, und wenn dies passiert, ist das Netz **140** bezüglich der Ebene isometrisch.

[0123] Das Problem entspricht somit dem eines Minimierens der elastischen Gesamtenergie des Systems:

$$U = \frac{1}{2} K \sum_{i=1 \dots N} \sum_{j \in N_i} [\hat{d}_{ij} - d_{ij}]^2$$

[0124] Dies wird unter Verwendung des weithin bekannten Gradientensenkungsverfahrens durchgeführt, das die Position der Knoten iterativ einstellt, bis die endgültige, niedrigste Energie erreicht ist. Es sei darauf hingewiesen, dass die elastische Konstante K während des Minimierungsprozesses ignoriert werden kann.

[0125] Die Knotenkoordinaten werden gemäß der folgenden Regel aktualisiert:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + w_{xi} \frac{\partial U}{\partial x_i} \quad y_i^{t+1} = y_i^t + w_{yi} \frac{\partial U}{\partial y_i}$$

wobei w ein Faktor ist, der später erörtert wird.

[0126] Eine Konvergenz ist erreicht, wenn alle Versetzungen unterhalb einer gesetzten Schwelle liegen.

[0127] Die Derivate sind einfach zu berechnen und wie folgt:

$$\frac{\partial U}{\partial x_i} = \sum_{j \in N_i} (\hat{d}_{ij} - d_{ij}) \frac{(x_i - x_j)}{d_{ij}} \quad \frac{\partial U}{\partial y_i} = \sum_{j \in N_i} (\hat{d}_{ij} - d_{ij}) \frac{(y_i - y_j)}{d_{ij}}$$

[0128] Es sei darauf hingewiesen, dass diese Derivate auch als das Ergebnis der Kräfte umgeschrieben werden, die durch sämtliche Federn **142**, die an jedem bestimmten Knoten verbunden sind, auf jeden der Knoten **144** ausgeübt werden.

[0129] In Anbetracht der Konvergenzeigenschaften der iterativen Optimierungsprozedur kann gezeigt werden, dass Konvergenz erzielt wird, wenn

$$w_{xi} = \frac{w}{\partial^2 U / \partial x_i^2}$$

(ähnlich für y_i) und $0 < w < 2$.

[0130] Ein Anpassungsexperiment hat dies bestätigt.

[0131] Der im Vorhergehende beschriebene Lockerungsprozess verhält sich gut und hat sich als der Oberfläche sehr präzise nahekommend herausgestellt. Dies ist in gewisser Weise überraschend, da der Satz von Punkten **95** während der Netzlockerung nicht verwendet wird. Die Grundlage für dieses überraschende Ergebnis liegt in der hochgradig beschränkten Beschaffenheit einer entwickelbaren Oberfläche oder ihrer diskreten Näherung, wie beispielsweise des Netzes **110** mit der Beschränkung, dass für jeden Knoten i , $d_{ij} = \text{konst.}$ Wenn das Netz auf die Daten initialisiert wird, erfüllen die Knoten diese Beschränkung nicht. Die Lockerungsprozedur bewirkt jedoch, dass Knoten orthogonal versetzt werden, um die Beschränkungen zu erfüllen. Die Form der Oberfläche ändert sich nicht dramatisch, was der Fall wäre, wenn die Versetzungen berührend wären. Diese wichtige Beobachtung ist dafür verantwortlich, dass das sich lockernde Netz der Oberfläche ohne Daten nahekommt.

[0132] Sobald das Netz ordnungsgemäß an die dreidimensionalen Daten angepasst worden ist, ist die nächste Phase ein Texturabbilden des anfänglichen planaren Netzes. Wie es vorhergehend erwähnt wurde, besteht mit dieser Technik kein Bedarf, die soeben angepasste Oberfläche zu entrollen, da diese bereits von Anfang besteht.

[0133] Texturabbilden zum Entwölben des gewellten Dokuments besteht aus drei Phasen, die in [Fig. 22](#) veranschaulicht sind. Zuerst werden sämtliche Kacheln **111** in dem planaren Netz **110** auf die gekennzeichnete Dokumentoberfläche **152** initialisiert und gelockert **150**, und zwar derart, dass eine Isometrie erhalten bleibt. Unter Verwendung der bekannten Abbildungsgeometrie wird die Kachel **111**, die nun auf der dreidimensionalen Oberfläche **152** liegt, auf die Bildebene **156** zurückprojiziert **154**, um die Textur **158** aus dem Bild zu erhalten, die derselben entspricht. Die letzte Phase ist ein Wölben **160** der Kacheltextur zurück **158** auf ihre entsprechende planare Kachel **111**, um die Textur wiederherzustellen, als ob sie ursprünglich in einem flachen Zustand erfasst worden wäre.

[0134] Sobald die Kachelabbildung wie im Vorhergehenden beschrieben berechnet worden ist, ist die Wölstufe **160** ein Standardprozess, und eine Anzahl exzellenter Algorithmen ist durch George Wolberg in einem Buch mit dem Titel Digital Image Warping, erschienen bei IEEE Computer Society Press, 1991, beschrieben.

[0135] Der Ansatz zur Dokumentkräuselungscharakterisierung, der im Vorhergehenden beschrieben ist, arbeitet ungeachtet des Papiertyps und der Dokumentkomplexität gut. Die Erfindung stellt ein praktisches und kostengünstiges Mittel zum Charakterisieren und Entwölben von Seitenkräuselung bereit. Im Besonderen ist das Profil des abgebildeten Dokuments durch Projizieren eines bekannten zweidimensionalen strukturierten Lichtmusters und Triangulieren mit dem Bild des Musters, das durch die Kamera aufgenommen wurde, bestimmt. Die Verwendung eines zweidimensionalen Musters, im Gegensatz zu einem einzelnen Streifen oder Punkt, ist bei diesen Anwendungen besonders erwünscht, da sie keine kostenintensiven sich bewegenden Teile (und deren Treiber) erforderlich macht und eine schnelle Charakterisierung der Seitenkräuselung mit einer einzigen Aufnahme, anstelle eines Überstreichens der Seite mit einem einzelnen Strahl, erlaubt.

[0136] Bei diesem Beispiel werden die Streifen lediglich aus Bildern der einfachen Streifen identifiziert, ohne das Detektorarray oder den Lichtstreifenprojektor bewegen zu müssen oder eine beliebige Art von zeitlicher oder räumlicher Modulierung auferlegen zu müssen, was die Systemkosten dramatisch erhöhen würde.

[0137] Das im Vorhergehenden beschriebene Verfahren zum Charakterisieren von Dokumentkräuselung ist praktisch und schnell und kann mit relativ kostengünstiger Hardware für eine Dokumentabbildungsanwendung unter Verwendung eines auflagenlosen Dokumentabbildungssystems implementiert werden. Die Erfindung kann allerdings auch bei anderen Typen von Abbildungssystemen, wie beispielsweise denen in auflagenbasierten Vorrichtungen wie Photokopierern und Flachbettscannern, verwendet werden.

[0138] Auch wenn ein bevorzugtes Ausführungsbeispiel der Erfindung mit Bezug auf eine bestimmte Technik zum Erzeugen des ersten Satzes von Punkten, der das dreidimensionale Profil der nicht planaren Oberfläche bezüglich einer planaren Referenzoberfläche darstellt, beschrieben wurde, können alternativ auch andere Typen von Techniken verwendet werden, beispielsweise solche, die eine Brennpunkterfassung oder eine Stereovision einsetzen.

[0139] Das im Vorhergehenden vorgestellte Verfahren zur Dokumentkräuselungskorrektur verwendet ein ma-

thematisches Papiermodell und einen wirksamen Initialisierungs- und Lockerungsprozess zum Anpassen dieses Modells an die Daten in einer Art und Weise, die ein unverzerrtes Bild natürlich erzeugt. Dies wird trotz der Tatsache erreicht, dass es eine große Zahl von Freiheitsgraden und eine große Zahl von Randbedingungen gibt, die mit spärlichen und rauschhaften Daten erfüllt werden müssen. Dieses Verfahren ist in der Lage, zu interpolieren, extrapolieren und selbständig zu vervollständigen, wo auch immer Daten fehlen sollten. Das Verfahren erzeugt entwölbte Bilder gewellter Dokumente von hoher Qualität durch Modellieren einer Papierverformung auf eine physikalisch realistische Art und Weise.

Patentansprüche

1. Ein Abbildungssystem (1) zur Abbildung einer nicht planaren entwickelbaren Oberfläche (30), wobei das System (1) einen Prozessor (25) aufweist, der mit einer Bilderfassungseinrichtung (2) verknüpft ist und in der Lage ist zum: Erfassen zumindest eines Bilds (31, 33) der Oberfläche (30), wobei das Bild (31, 33) eine Wölbung entsprechend der nicht planaren Oberfläche aufweist; und Erzeugen aus demselben eines ersten Satzes von Punkten (95), die das dreidimensionale Profil der nicht planaren Oberfläche relativ zu einer planaren Referenzoberfläche (12) darstellen, gekennzeichnet dadurch, dass der Prozessor (25) angeordnet ist zum: Anpassen an den ersten Satz von Punkten (95) einen zweiten Satz von Punkten (117), die ein nicht entwickelbares verzerrtes dreieckiges Netz (133) darstellen, das sich an das dreidimensionale Profil der nicht planaren Oberfläche (30) annähert; nachfolgend, Lockern des zweiten Satzes von Punkten, derart, dass das dreieckige Netz entwickelbar ist; und Verwenden des gelockerten zweiten Satzes von Punkten (117), um das Bild (150, 154, 160) texturabzubilden, um das Bild (32) zu entwölben.

2. Ein Verfahren zur Abbildung einer nicht planaren entwickelbaren Oberfläche (30) unter Verwendung eines Abbildungssystems (1), das einen Prozessor (25) aufweist, der mit einer Bilderfassungseinrichtung (2) verknüpft ist, wobei das Verfahren folgende Schritte aufweist:

- i) Erfassen zumindest eines Bilds (31, 33) der Oberfläche (30), wobei das Bild eine Wölbung entsprechend der nicht planaren Oberfläche (30) aufweist;
- ii) Erzeugen, aus dem Bild (31, 33), einen ersten Satzes von Punkten (95), die das dreidimensionale Profil der nicht planaren Oberfläche (30) relativ zu einer planaren Referenzoberfläche (12) darstellen; gekennzeichnet dadurch, dass das Verfahren die folgenden Schritte aufweist:
- iii) Anpassen an den ersten Satz von Punkten einen zweiten Satz von Punkten (117), die ein nicht entwickelbares verzerrtes dreieckiges Netz (133) darstellen, das sich an das dreidimensionale Profil der nicht planaren Oberfläche annähert;
- iv) nachfolgend, Lockern des zweiten Satzes von Punkten, derart, dass das verzerrte Netz sich in einem entwickelbaren Zustand befindet; und
- v) Verwenden des gelockerten zweiten Satzes von Punkten (117), um das Bild (31, 33) texturabzubilden (150, 154, 160), um das Bild zu entwölben.

3. Ein Verfahren gemäß Anspruch 2, bei dem vor dem Schritt iii) eine ursprüngliche Oberfläche (130) an den ersten Satz von Punkten angepasst wird und in Schritt iii) das verzerrte Netz (133) an die ursprüngliche Oberfläche (130) angepasst wird.

4. Ein Verfahren gemäß Anspruch 3, bei dem die ursprüngliche Oberfläche (130) eine entwickelbare Oberfläche ist und bei dem nach dem Anpassen des Netzes (133) an die ursprüngliche Oberfläche (130) zumindest manche des zweiten Satzes von Punkten (117) näher zu entsprechenden des ersten Satzes von Datenpunkten (95) bewegt (132) werden, währenddessen das Netz (133) verzerrt wird.

5. Ein Verfahren gemäß einem der Ansprüche 2 bis 4, bei dem Punkte (134) in dem zweiten Satz von Punkten nicht an den ersten Satz von Punkten (95) angepasst werden, wenn die Punkte (134) in dem zweiten Satz von Punkten nicht genau genug jегlichen der Punkte in dem ersten Satz von Punkten (95) entsprechen.

6. Ein Verfahren gemäß einem der Ansprüche 2 bis 5, bei dem die Lockerung des Netzes (140) in einem iterativen Prozess stattfindet, in dem der zweite Satz von Punkten (117) inkrementweise eingestellt wird, bis Abstände zwischen Punkten in dem zweiten Satz von Punkten ausgeglichen sind.

7. Ein Verfahren gemäß einem der Ansprüche 2 bis 6, bei dem die nicht planare entwickelbare Oberfläche ein gewelltes Dokument (30) ist.

8. Ein Verfahren gemäß Anspruch 7, bei dem die Erstreckung des Dokuments (30) durch Anpassen eines

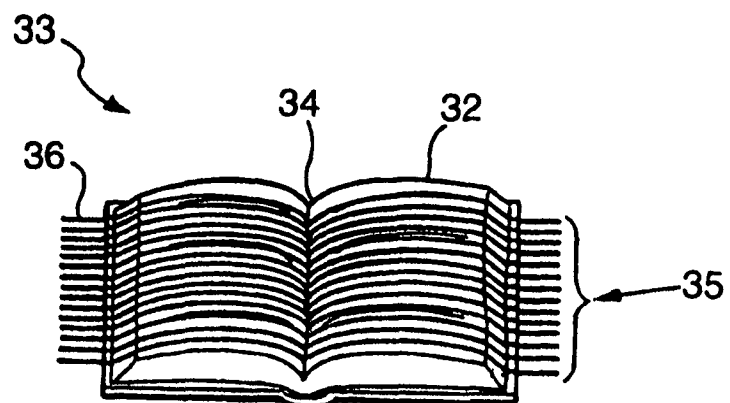
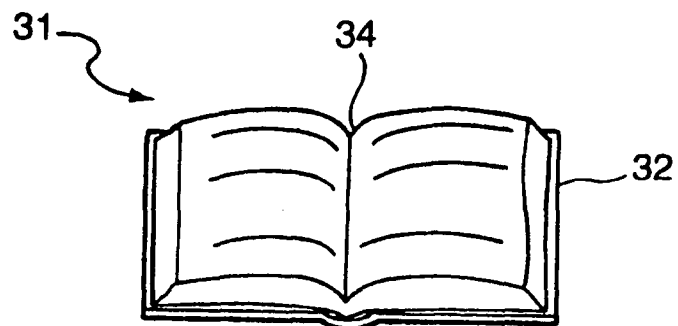
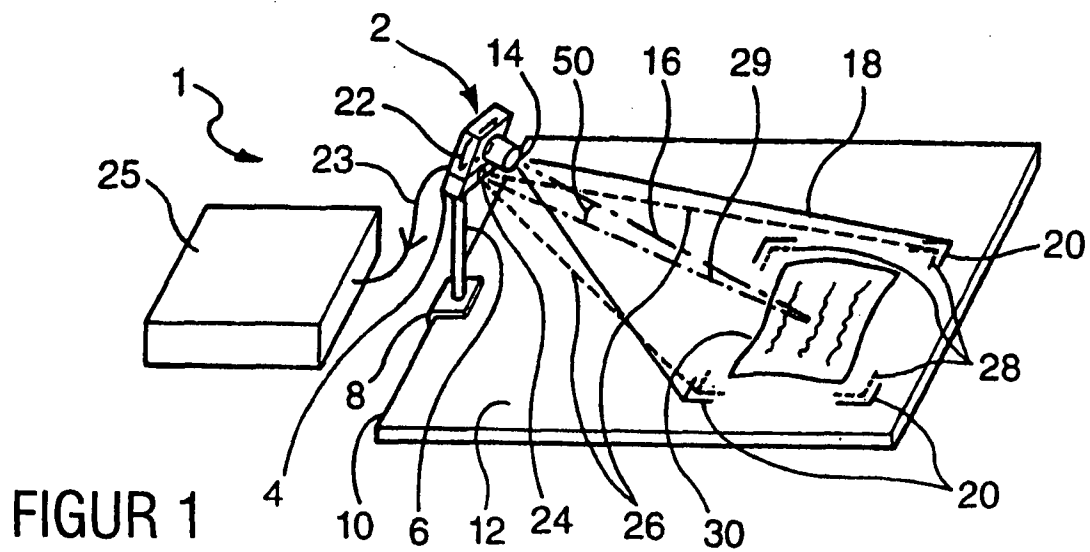
Rechtecks (124) um Extrempunkte (126, 128) des ersten Satzes von Punkten (95) herum geschätzt wird.

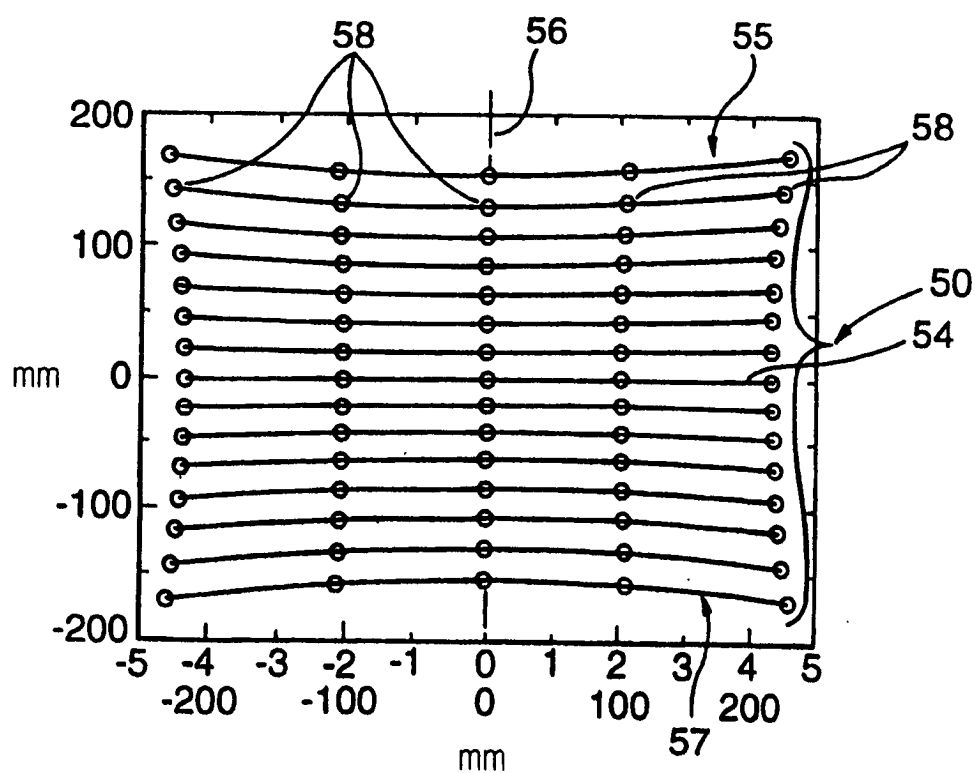
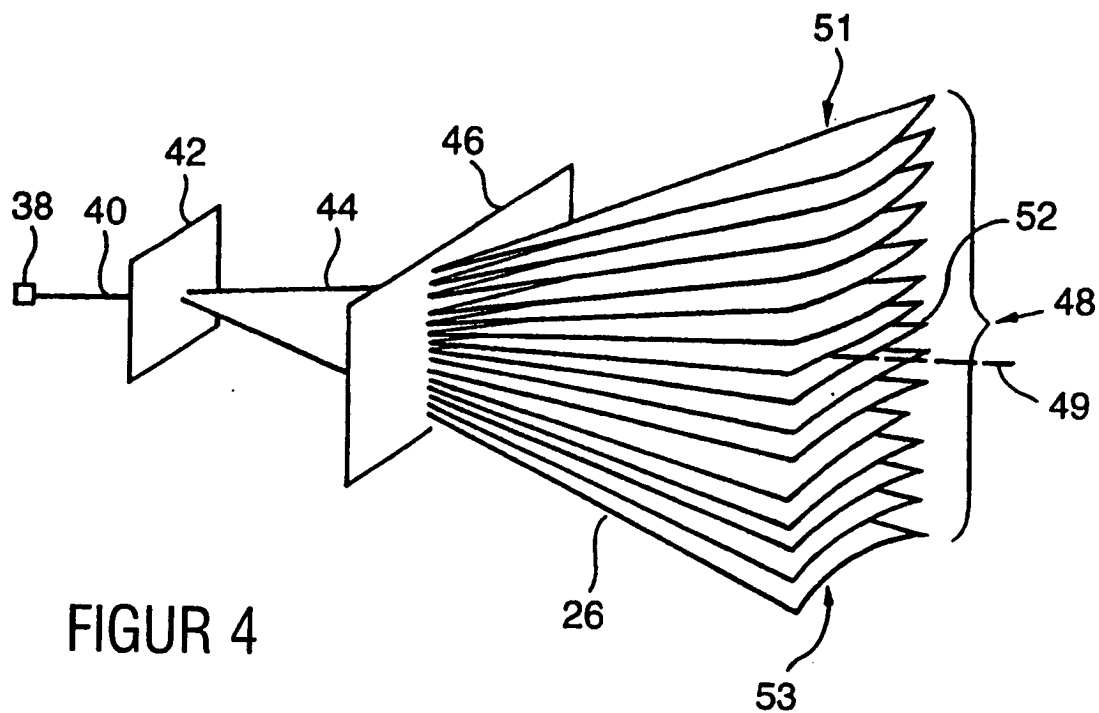
9. Ein Verfahren gemäß Anspruch 7 oder 8, bei dem die Bilderfassungseinrichtung (2) ein strukturiertes Lichtmuster (26), das getrennte Lichtstreifen (35) bildet, über die nicht planare entwickelbare Oberfläche (30) wirft, wobei der erste Satz von Punkten (95) aus den Lichtstreifen (35) erzeugt wird.

10. Ein Verfahren gemäß Anspruch 9, bei dem Schritt ii) die folgenden Schritte umfasst:

- a) Erzeugen eines Differenzbilds durch Abziehen einer Differenz zwischen einem mit den Streifen erfassten Bild (33) und einem ohne die Streifen erfassten Bild (31);
- b) Unterziehen des Differenzbilds einer Schwellenbewertung, um Abschnitte unterhalb einer Schwelle auszu-sondern;
- c) Zählen erfasster Streifen über das Differenzbild, um einzelne Streifen (35) zu identifizieren;
- d) Triangulieren (84) des Bilds der nicht planaren Oberfläche an Punkten (86), die identifizierten Streifen (35) entsprechen, um den ersten Satz von Punkten (95) zu erzeugen.

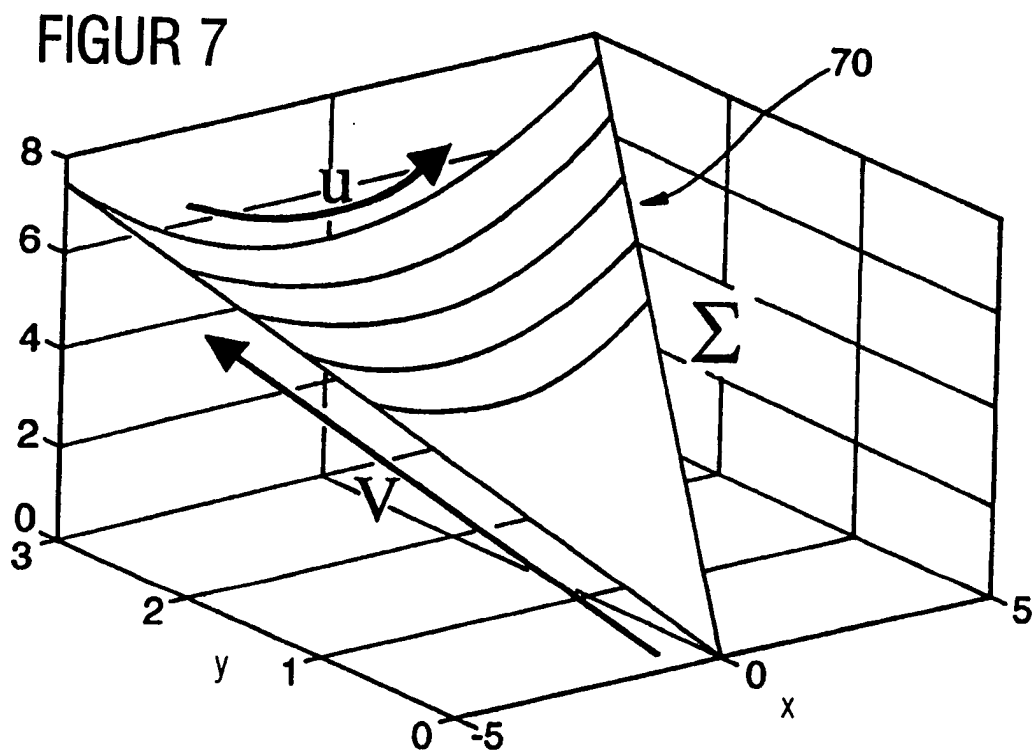
Es folgen 10 Blatt Zeichnungen



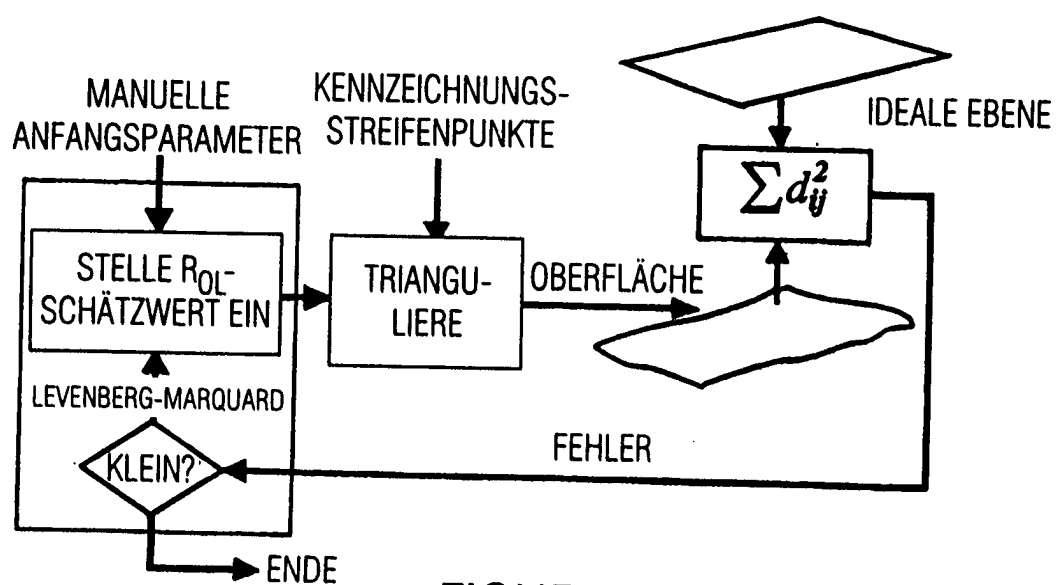




FIGUR 6

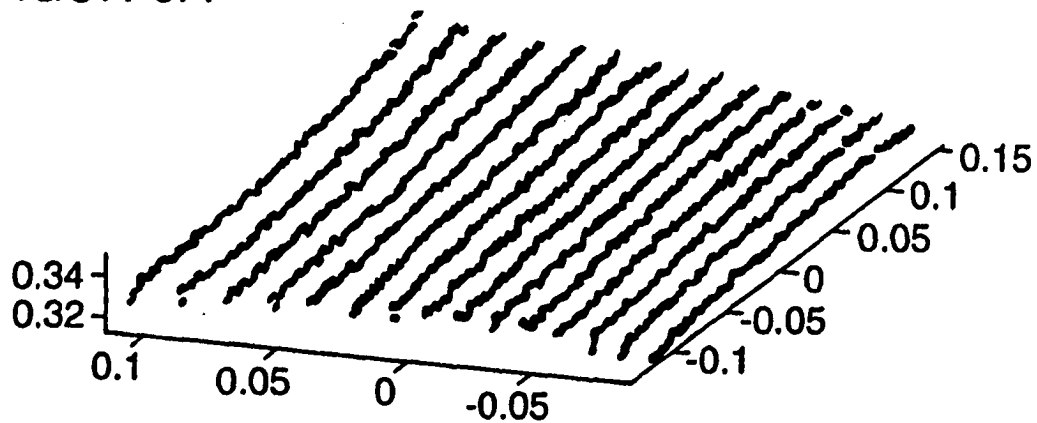


FIGUR 7

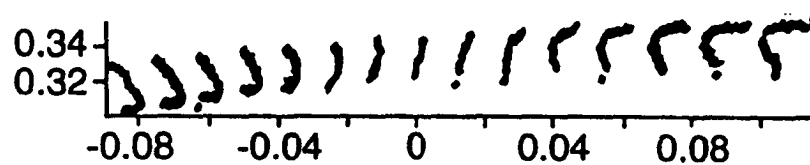


FIGUR 8

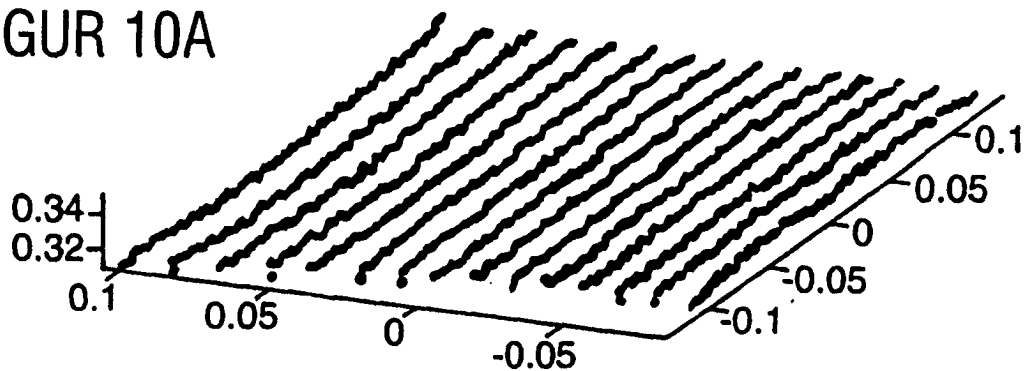
FIGUR 9A



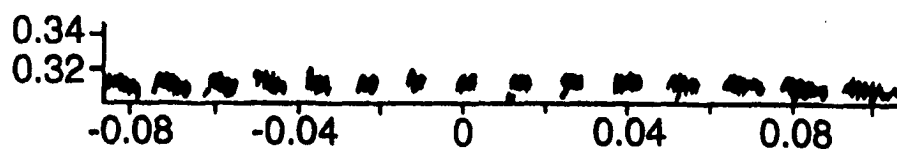
FIGUR 9B

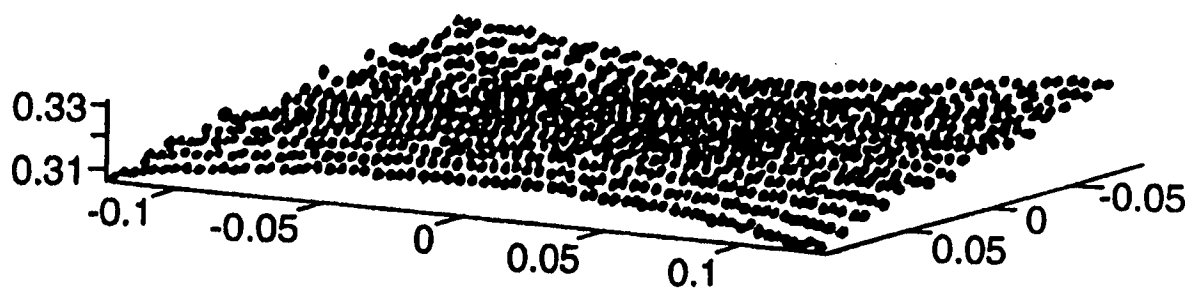


FIGUR 10A

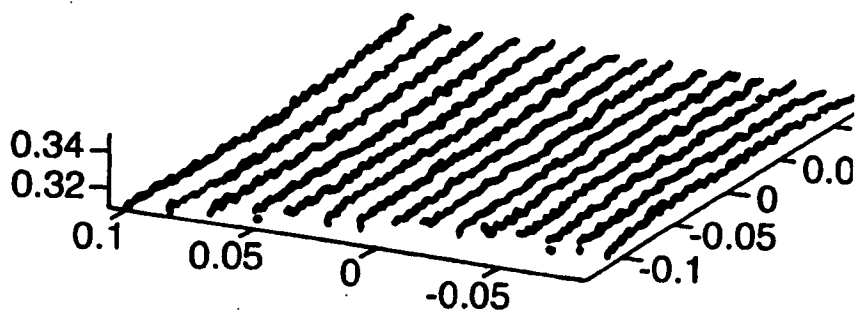


FIGUR 10B

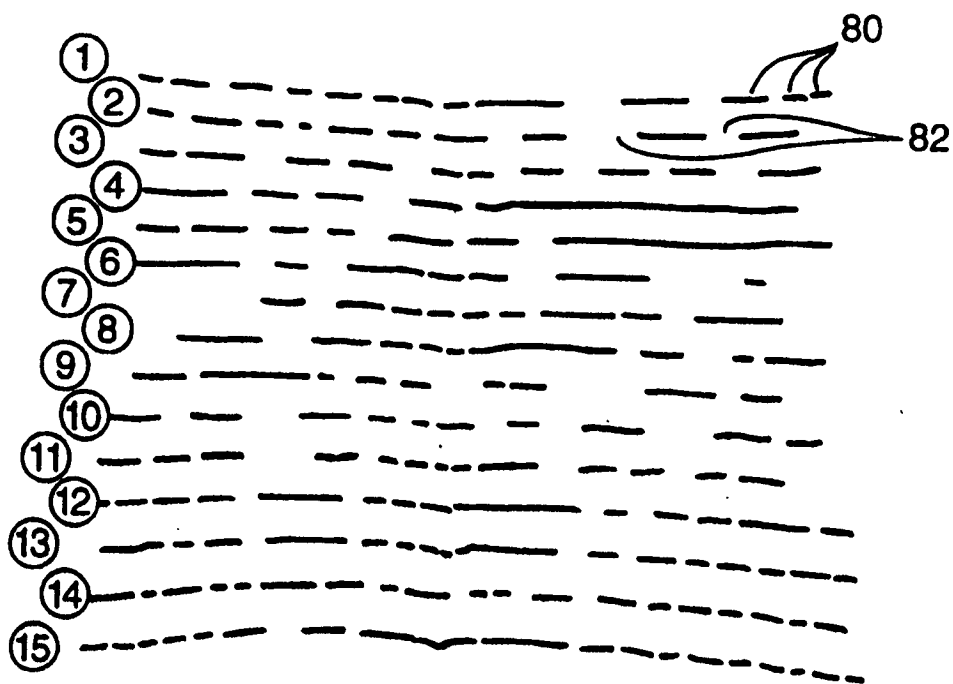




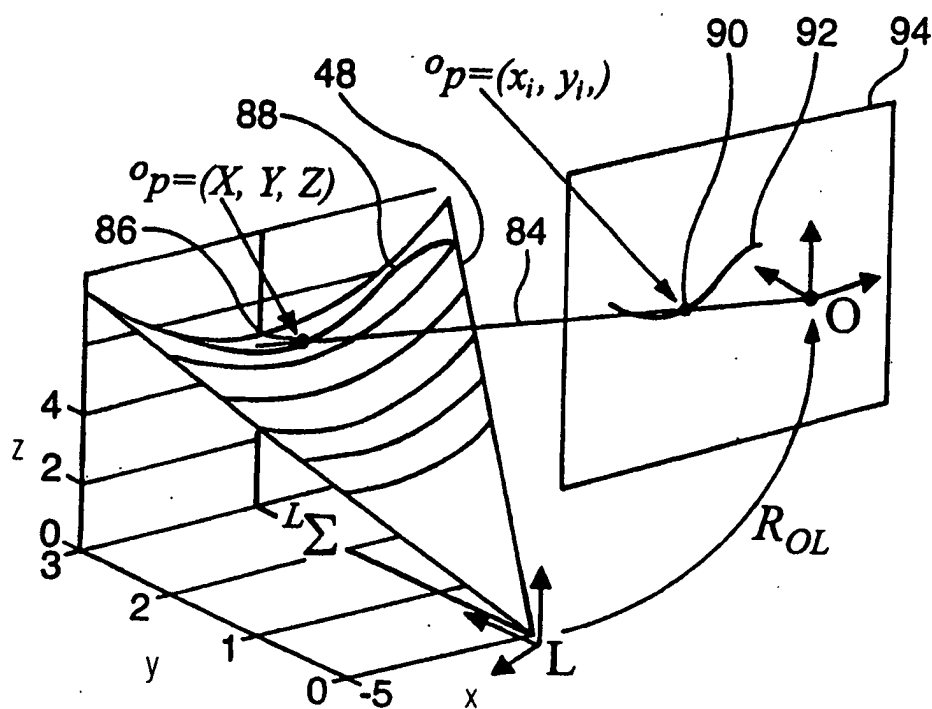
FIGUR 11A



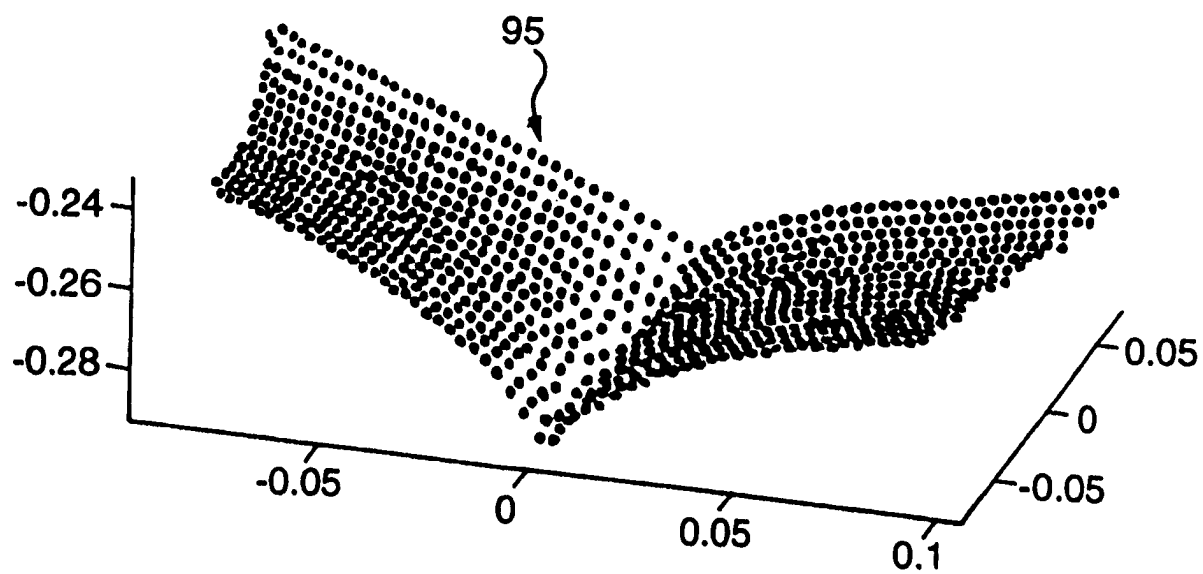
FIGUR 11B



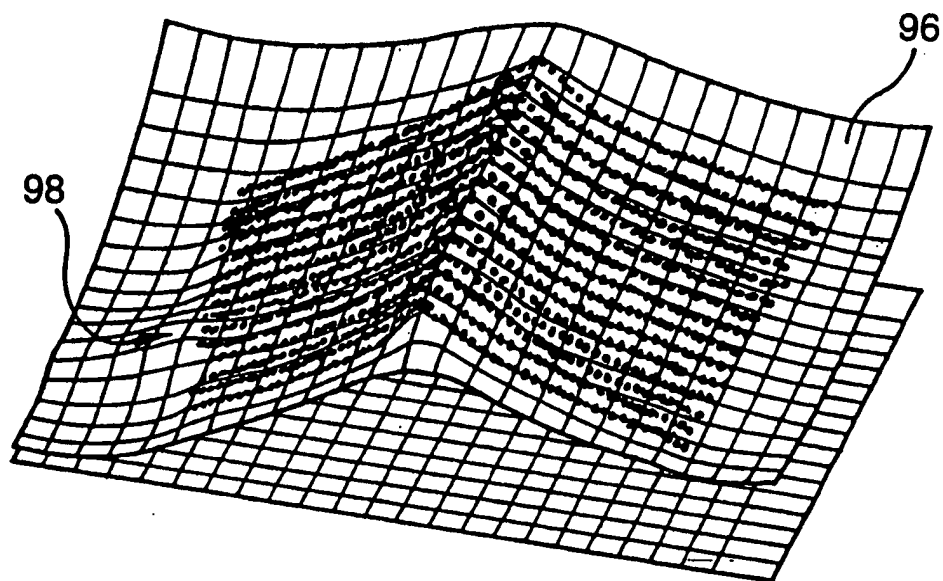
FIGUR 12



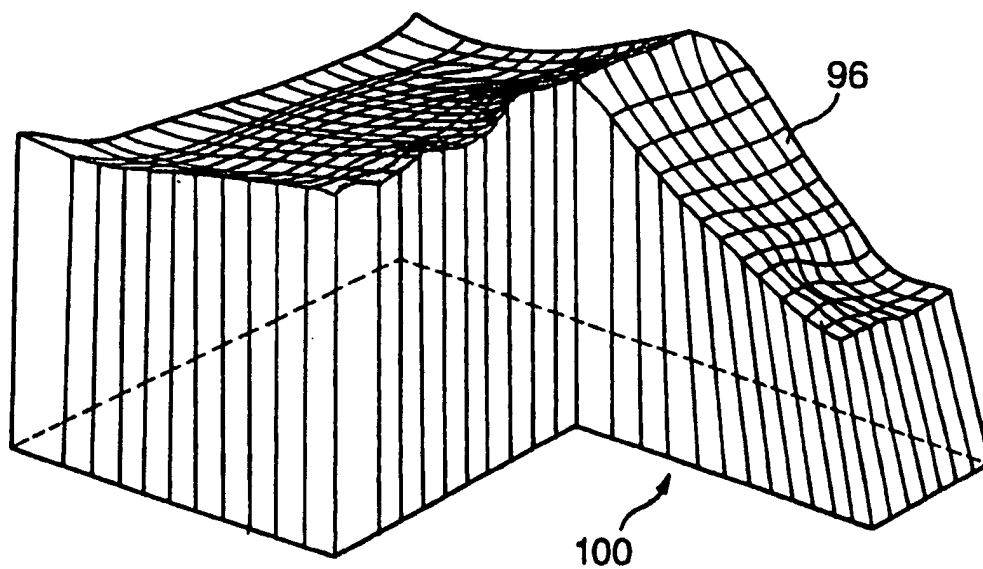
FIGUR 13



FIGUR 14



FIGUR 15



FIGUR 16

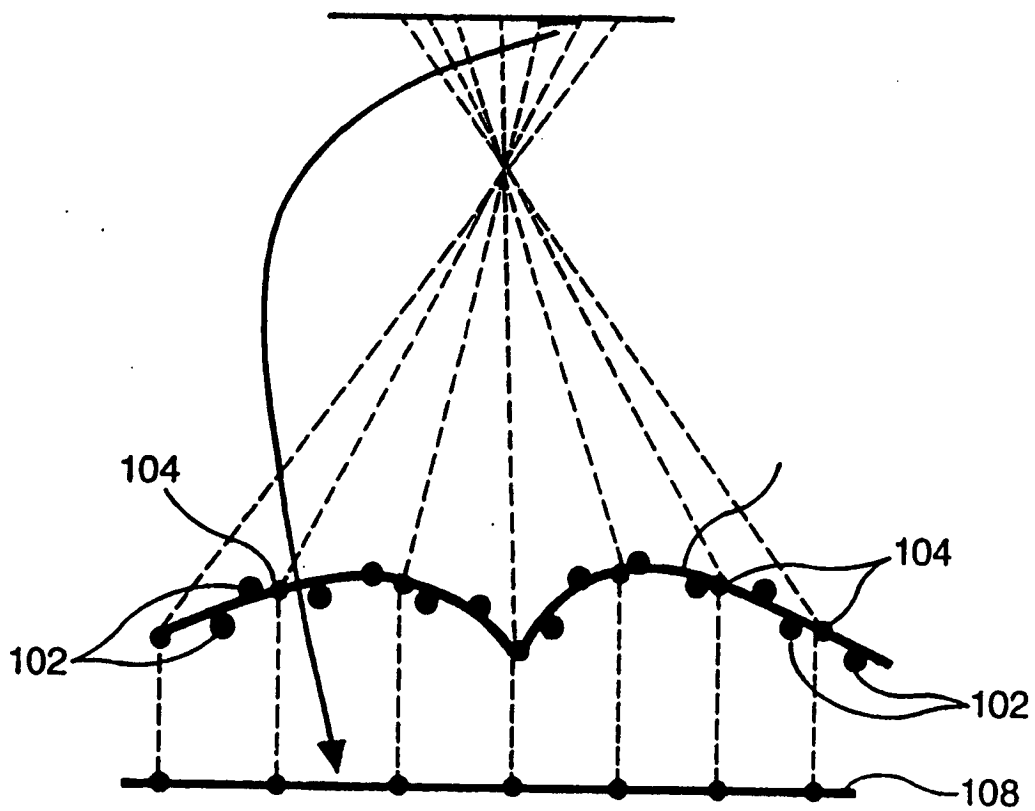


FIGURE 17

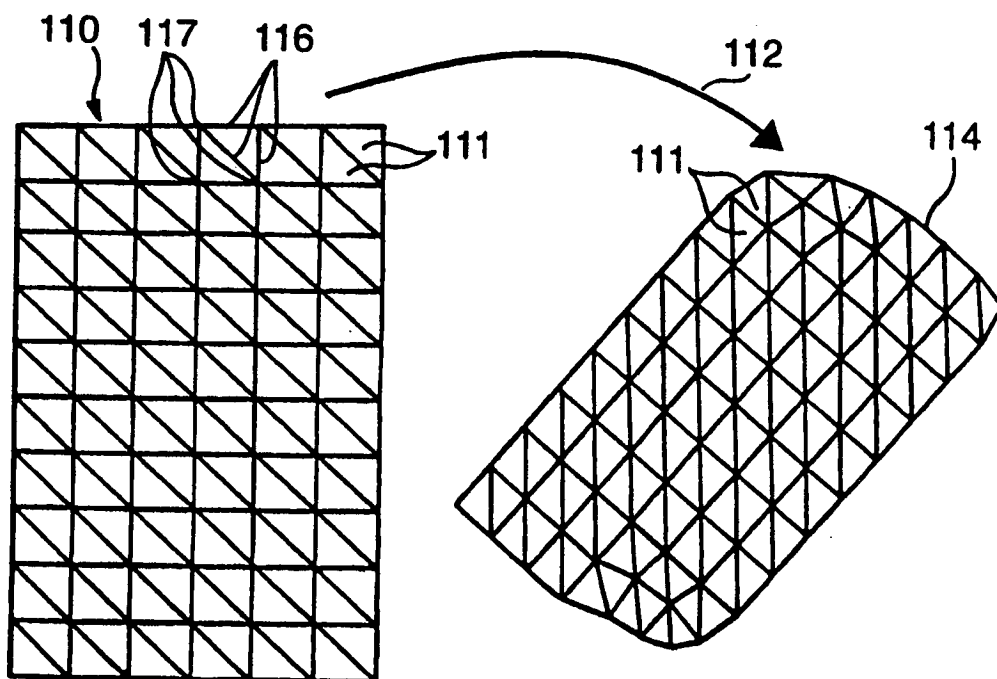


FIGURE 18

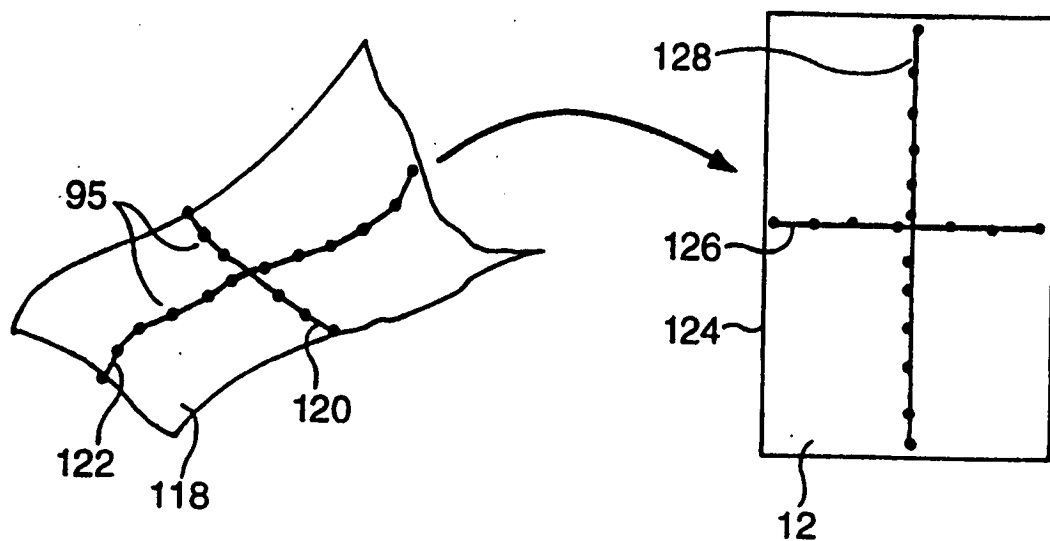


FIGURE 19

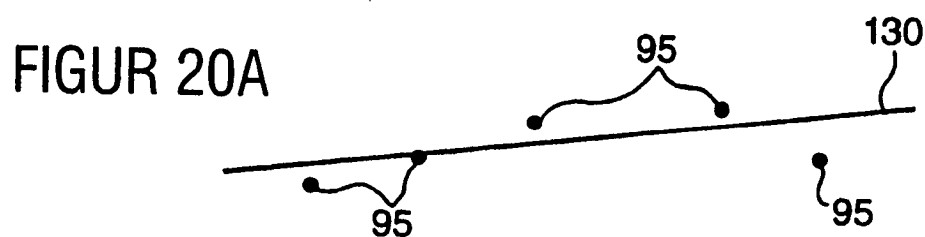


FIGURE 20B

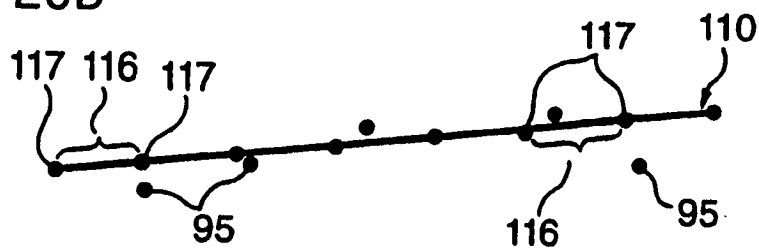


FIGURE 20C

