



(19)  
Bundesrepublik Deutschland  
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 696 28 956 T2** 2004.05.27

(12)

## Übersetzung der europäischen Patentschrift

(97) **EP 1 160 539 B1**

(51) Int Cl.<sup>7</sup>: **G01B 11/24**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **696 28 956.3**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **01 202 867.6**

(96) Europäischer Anmeldetag: **25.07.1996**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **05.12.2001**

(97) Veröffentlichungstag

der Patenterteilung beim EPA: **02.07.2003**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **27.05.2004**

(30) Unionspriorität:

**9515311      26.07.1995      GB**

(84) Benannte Vertragsstaaten:

**DE, FR, GB, IT, SE**

(73) Patentinhaber:

**Crompton, Stephen James, Waltham Cross,  
Hertfordshire, GB**

(72) Erfinder:

**Crompton, Stephen James, Waltham Cross, Herts  
EN7 5JU, GB**

(74) Vertreter:

**Strehl, Schübel-Hopf & Partner, 80538 München**

(54) Bezeichnung: **Abtastvorrichtung und -verfahren**

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] Diese Erfindung betrifft das Gebiet des Abtastens dreidimensionaler Objekte.

[0002] Reale dreidimensionale Objekte sind unabhängig davon, ob sie in natürlicher Form (beispielsweise geographische Objekte, Pflanzen, Menschen oder tierartige Objekte) oder in vom Menschen erschaffter Form (beispielsweise Skulpturen, Reliefe, Autos, Boote, Flugzeuge oder Verbrauchererzeugnisse) auftreten, schwierig abzutasten. Dies liegt an Merkmalen, wie sich schnell ändernden Oberflächennormalen und an Oberflächen, für die es schwierig ist, eine Sichtlinie zu erhalten, weil sie von anderen Teilen des Objekts teilweise abgedeckt wird.

[0003] Abtastmaschinen, die auch als Digitalisiermaschinen bekannt sind, welche für das Abtasten von Objekten oder Teilen von Objekten vorgesehen sind, können in zwei Typen unterteilt werden, nämlich in durch einen Computer numerisch gesteuerte (CNC) Maschinen und in von Hand betätigte Maschinen. Eine Abtastmaschine weist eine Einheit auf, die eine üblicherweise als eine Sonde bezeichnete Meßeinrichtung enthält.

[0004] Objekte oder Teile von Objekten können von CNC-Abtastmaschinen mit einer Anzahl von einem Computer numerisch gesteuerter (CNC) linearer und sich drehender motorgetriebener Achsen abgetastet werden. Verschiedene CNC-Maschinen können die Sonde oder das Objekt oder beide durch eine Kombination einer Translation und einer Drehung um diese Achsen bewegen bzw. umorientieren. Es sind verschiedene Maschinenkonstruktionen für verschiedene Objektklassen geeignet. Sonden können vorübergehend oder permanent an den meisten Typen von CNC-Werkzeugmaschinen oder einer CNC-Koordinatenmeßmaschine angebracht werden, welche dann für das Abtasten verwendet werden kann. Beispielsweise können kleine und einfache dreiachsige CNC-Fräsmaschinen verwendet werden, oder es können große, komplexe fünfachsiges Maschinen verwendet werden. Die von CNC-Maschinen eingefangenen Punkte liegen gewöhnlich auf einem rechtwinkligen Gitter, und die Rate variiert von etwa 1 Punkt je Sekunde bis zu etwa 20000 Punkten je Sekunde, wobei dies von der verwendeten Technologie und dem abgetasteten Objekt abhängt. Die Punkte von diesen Abtastmaschinen sind in der Größenordnung von 0,05 mm genau. CNC-Maschinen mit Sonden tasten durch Ausführen von einem oder mehreren Programmen ab, welche die Achsen der Maschine so bewegen, daß eine Relativbewegung zwischen der Sonde und dem Objekt auftritt.

[0005] CNC-Maschinen sind kostspielig, wobei dies teilweise an der Aufnahme von Motoren und den zugeordneten Einrichtungen zum Sicherstellen einer genauen Bewegung, wie Linearführungen und Antriebschnecken, liegt. Wenige CNC-Maschinen sind flexibel genug, damit die Sonde in sechs Freiheitsgraden orientiert werden kann, um die vollständige

Oberfläche eines komplexen Objekts abzutasten. Selbst wenn eine CNC-Maschine sechs Freiheitsgrade hat, ist sie häufig nicht flexibel genug, um die Sonde zu positionieren, um die vollständige Oberfläche des Objekts abzutasten, ohne mit dem Objekt zusammenzustoßen. Wenn das Objekt eine Person oder ein kostspieliger Gegenstand ist, kann das Risiko der Verwendung einer CNC-Maschine inakzeptabel werden, und es wäre erforderlich, eine Maschine herzustellen, die sowohl die Sicherheitsaspekte als auch die Abtastanforderungen für die Anwendung erfüllt. Die Programmierung einer CNC-Maschine, so daß die Oberfläche des Objekts vollständig abgetastet wird, ohne daß die Sonde oder die Maschine mit dem Objekt zusammenstößt, ist häufig sehr komplex. Gewöhnlich bedeuten die Konstruktion der Maschine und die der Konstruktion eigenen Freiheitsgrade und Begrenzungen der Sondenkonstruktion, wie der Abstand zwischen der Sonde und dem Objekt während des Abtastens, daß es nicht möglich ist, eine Abtaststrategie zu entwickeln, welche die vollständige Oberfläche des Objekts abtastet. Es ist üblich, daß das Objekt während des Abtastens ein oder mehrere Male von Hand aufgenommen und an einer anderen Position oder in einer anderen Orientierung wieder angeordnet werden muß. Jedesmal, wenn dies geschieht, muß das Objekt wieder in bezug auf ein gleichmäßiges Koordinatensystem angeordnet werden, so daß die Daten von den verschiedenen Abtastvorgängen genau kombiniert werden können.

[0006] Die vorliegende Erfindung betrifft von Hand betriebene Abtastmaschinen.

[0007] Von Hand betriebene Abtastmaschinen können in drei Typen eingeteilt werden, nämlich in Maschinen mit einem horizontalen Arm, in Maschinen mit mehrgelenkigen Armen und in Vorrichtungen, die auf einer Fernpositions-Erfassungseinrichtung beruhen.

[0008] Von Hand betriebene, einen horizontalen Arm aufweisende Meßmaschinen haben gewöhnlich drei orthogonale Achsen und beruhen gewöhnlich auf einer Konstruktion mit einer sich bewegenden Säule. Diese Maschinen sind gewöhnlich recht groß, wobei sich das Bett auf dem Fußbodenniveau befindet, so daß große Gegenstände, wie Autos, leicht auf sie und von ihnen fort bewegt werden können. Häufig können Motoren an einer oder mehreren Achsen angebracht werden, um die manuelle Bewegung der Maschine zu unterstützen. Die Sonde wird normalerweise in einer festen Orientierung am Ende des horizontalen Arms angebracht. Diese Orientierung kann geändert werden, und es können verschiedene Vorrichtungen zwischen dem Ende des horizontalen Arms und der Sonde angebracht werden, um beim Wechseln der Orientierung zu helfen, wobei die meisten dieser Vorrichtungen zwei Achsen haben. Maschinen mit einem horizontalen Arm haben den Nachteil, daß sie nicht leicht dazu in der Lage sind, die Sonde in sechs Freiheitsgraden zu orientieren. Die begrenzte Flexibilität der Konstruktion einer Ma-

schine mit einem horizontalen Arm bewirkt, daß der größte Teil der fernen Seite des Objekts nicht abgetastet werden kann.

[0009] Mehrgelenkige Arme weisen üblicherweise mehrere Verbindungsglieder auf, und sie sind für das Abtasten komplexer Objekte verfügbar. Ein mehrgelenkiger Arm hat typischerweise 6 Gelenkachsen, er kann jedoch auch mehr oder weniger Gelenkachsen aufweisen. Am Ende des mehrgelenkigen Arms befindet sich ein Spitzenbezugspunkt in der Art einer Kugel, deren Mitte der Bezugspunkt ist, oder eines in einem Punkt endenden Kegels. Das Abtasten wird ausgeführt, indem der Punkt oder die Kugel in Kontakt mit dem abgetasteten Objekt gebracht wird. Der Computer, der den mehrgelenkigen Arm überwacht, mißt dann den Winkel an allen Gelenken des mehrgelenkigen Arms und berechnet die Position dieses Bezugspunkts im Raum. Die Richtung der letzten Verbindung im mehrgelenkigen Arm wird auch berechnet. Positionen können typischerweise kontinuierlich mit einer Rate von etwa 100 Punkten je Sekunde ausgegeben werden, die Rate kann jedoch auch viel größer oder viel kleiner sein. Die Genauigkeit liegt in der Größenordnung von 0,1 bis 0,5 mm. Die Punkte von dem Arm sind gewöhnlich spärlich und unorganisiert. Die Spärlichkeit und die mangelnde Organisation der Punkte machen es schwierig, ausreichend Informationen zum Erstellen eines Computermodells des Objekts mit einer annehmbaren Qualität bereitzustellen. Ein mehrgelenkiger Arm mit mehreren Verbindungsgliedern hat ein begrenztes Arbeitsvolumen. Falls ein größeres Arbeitsvolumen erforderlich ist, werden die Arme im allgemeinen sehr kostspielig, weniger genau und ermüdend sowie schwer zu betätigen. Das begrenzte Arbeitsvolumen kann durch sprungweises Bewegen vergrößert werden, wobei der Arm bzw. die Basis sprungweise bewegt wird, um auf ein anderes Volumen zuzugreifen, hierfür ist jedoch ein zeitaufwendiges System erforderlich, das jedesmal dann, wenn der Arm bewegt wird, wenigstens 3 Punkte registriert und die Datensätze von jeder Armposition rekombiniert. Hersteller mehrgelenkiger Arme stellen vorkalibrierte Arme und Testverfahren bereit, die der Benutzer verwenden kann, um sicherzustellen, daß der Arm noch mit einer annehmbaren Genauigkeit kalibriert ist.

[0010] Diese Testverfahren verwenden beispielsweise den Standard-Spitzenbezugspunkt am Ende des Arms und eine Bezugskugel oder eine Bezugs-Kugelhange, die ein Stab mit zwei zylindrischen Schalen ist, der einen genau bekannten Abstand zwischen einer Ausgangskugel und einem Ende einer Armkugel aufweist. Wenn die Armspitze am Ende der Kugelhange auf der Oberfläche eines kugelförmigen Bereichs bewegt wird, zeichnet der Arm Positionen auf, die später mit einer vollkommenen Kugel verglichen wird, und es werden Fehler-schätzungen für den Arm ausgegeben.

[0011] Fernpositions-Erfassungsvorrichtungen umfassen von Hand gehaltene Vorrichtungen, welche

Positionsinformationen in einem kalibrierten Bezugsvolumen unter Verwendung verschiedener physikalischer Verfahren einschließlich elektromagnetischer Impulse und Schallwellen senden oder empfangen. Eine von Hand gehaltene Vorrichtung kann durch ein Kabel mit dem restlichen System verbunden sein. Diese Vorrichtungen neigen dazu, Abtastpunkte mit sehr großen Fehlern zu erzeugen, und manche Vorrichtungen können nicht arbeiten, wenn das abgetastete Objekt metallische Bestandteile aufweist. Sie sind weniger genau als mehrgelenkige Arme, wobei die Genauigkeiten in der Größenordnung von 0,5 mm und darüber liegen.

[0012] Es gibt drei breite Kategorien von abtastenden Sonden, die am Ende einer mehrgelenkigen Abtastmaschine angebracht werden können, nämlich Punkt-Abtastsonden, Streifen-Abtastsonden und Flächensonden. Punktsonden messen einen einzigen Punkt zur Zeit, und die Technologien umfassen mechanische Kontaktverfahren und optische Abstandsmeßverfahren. Streifensonden messen eine Anzahl von Punkten in einer Zeile entweder gleichzeitig oder schnell in einer Abtastfolge, wobei die gebräuchlichste Technologie in einer Laserstreifentriangulation besteht. Flächensonden messen ein zweidimensionales Feld von Punkten auf einer Oberfläche entweder gleichzeitig oder in einer Abtastfolge, wobei die gebräuchlichsten Technologien in einer Interferenzstreifen- und einer Mehrfachstreifenprojektion bestehen. Es ist bei manchen Flächenverfahren erforderlich, daß die Vorrichtung während der Datenerfassung einige Sekunden ruhig gehalten wird. Streifen- und Flächenverfahren haben einen eingebauten Geschwindigkeitsvorteil gegenüber Punktverfahren, weil es eine geringere Bewegung der Sonde in Bezug auf das Objekt gibt. Es gibt Unterschiede zwischen den Verfahren in Bezug auf die Genauigkeit und die Kosten, diese lassen sich jedoch nicht für die Kategorie verallgemeinern, wobei eine bestimmte Flächentechnologie beispielsweise kostengünstiger und genauer sein kann als eine andere Punkttechnologie.

[0013] Mittel zum Erfassen unabhängiger Bezugs- und Merkmalspunkte durch Kontakt sind wohlbekannt und wirksam. Strukturiertes Licht unter Verwendung von Streifen- oder Flächenverfahren ist nicht gut für das Erfassen unabhängiger Merkmalspunkte geeignet, weil es für den Bediener keinen Weg gibt, einen bekannten Punkt auf dem Objekt mit einem Punkt auf dem Streifen oder in dem Bereich auszurichten.

[0014] Geometrische Fehler beim Abtastprozeß stammen von vielen Quellen. CCD-Kameras können Videos typischerweise mit 25 Rahmen je Sekunde erfassen. Ein Hauptnachteil bei der normalen Verwendung besteht darin, daß bei jeder gegebenen Anforderung eines Rahmens eine Veränderlichkeit von 40 ms bis zum Beginn der Erfassung dieses Rahmens auftritt. Falls die Sonde beispielsweise mit 100 mm/s bewegt wird, kann dies zu einem geometrischen Fehler von 4 mm in den Sondendaten führen. Die Dauer

der Rahmenerfassung hängt von der Verschlußgeschwindigkeit ab, wobei 1/100 s beispielsweise 10 ms entspricht. Ein Hauptnachteil bei der normalen Verwendung besteht darin, daß ein zusätzlicher geometrischer Fehler erzeugt wird, falls die Sonde mit einer geringen Verschlußgeschwindigkeit bewegt wird. Ein Arm ist typischerweise durch ein serielltes Kabel mit einem Computer verbunden, wobei Arme typischerweise 125 Positionen je Sekunde erzeugen, wenn sie sich bewegen, wobei bei dieser Rate eine Veränderlichkeit von 8 ms zwischen dem Zeitpunkt, zu dem eine Position am Computer erforderlich ist, und dem Zeitpunkt, zu dem sie ankommt, auftritt. Hierdurch kann auch ein geometrischer Fehler herbeigeführt werden, wenn sich die Sonde bewegt. Die Gesamtveränderlichkeiten der CCD-Kamera und des Arms können große angesammelte Fehler hervorrufen.

[0015] Es gibt im heutigen Gebrauch einen großen Bereich von Formaten für 3D-Informationen. Diese umfassen die allgemeinen Kategorien Punktformate, Polygonformate und komplexe Oberflächenformate.

[0016] Punktformate umfassen unabhängige Punkte, Punktklinien, in denen eine Ebene eine Fläche schneidet, 2,5D-Punktflächen, die gemeinhin als Bereichsbilder bekannt sind, welche einwertig in Z- und 3D-Punktfeldern sind, die häufig von medizinischen Abtasteinrichtungen verwendet werden. Die Punktformate haben viele Standarddarstellungen einschließlich des Range Image Standard (RIS), der sich aus dem europäischen ESPRIT Research & Development Project 6911, ergibt, IGES und DXF, die von AutoDesk Inc. in den USA veröffentlicht wurden.

[0017] Polygonformate umfassen Polygone unterschiedlicher geometrischer Form. Polygone können 3- oder mehrseitig sein, und ihre Formate können gemischte Anzahlen von Seiten oder stets die gleiche Anzahl von Seiten umfassen. Spezialfälle, wie die Delaunay-Triangulation, können die Positionierung von Scheitelpunkten und die relativen Längen von Polygonseiten spezifizieren. Standarddarstellungen von Polygonformaten umfassen STL, veröffentlicht von 3D Systems Inc. in den USA, IGES, OBJ, veröffentlicht von Wavefront Inc. in den USA, und DXF.

[0018] Komplexe Oberflächenformate umfassen Bezier-, NURBS- und COONS-Flecken. Standarddarstellungen komplexer Oberflächenformate umfassen IGES, VDA-FS, SET, STEP und DXF.

[0019] Der Zweck des Abtastens kann einfach darin bestehen, eine Anzahl dreidimensionaler Punkte an der Oberfläche des Objekts zu sammeln, oder er kann darin bestehen, ein Computermodell in einem Format zu erzeugen, das für die Anwendung nützlich ist, in der das Modell zu verwenden ist.

[0020] Es ist im allgemeinen wahr, daß eine Punktwolke allein bei vielen Anwendungen nicht sehr gut verwendbar ist und daß mehr Struktur erforderlich ist, um ein Computermodell einzurichten, so daß es zur Manipulation bei typischen Anwendungen, wie einer Sichtbarmachung, einer Animation, einer Formge-

staltung und einer Oberflächen- oder Festkörpermodellierung, wirksam ist.

[0021] Häufig lassen sich Vorteile erzielen, wenn die Größe der den Modellformaten zugeordneten Dateien verringert wird. Jede Datei kann, unabhängig davon, welches ihr Format ist, unter Verwendung umkehrbarer Standard-Anwenderprogramme, wie PKZIP/PKUNZIP von PKWare aus den USA, komprimiert werden. Bei 3D-Punktfeldern kann ein Oktettformat zum Verringern der Größe der eine Oberfläche darstellenden Felder verwendet werden, wobei ein Oktettformat ein Würfelvolumen in acht kleinere Würfel unterteilt und Würfel nur dann weiter in acht Würfel unterteilt, falls sie Informationen enthalten. Ein Oktettformat ist umkehrbar. Beim Übergehen von einer unstrukturierten Punktdarstellung zu Polygonformaten oder komplexen Oberflächenformaten werden häufig große Kompressionen erzeugt, sie beruhen jedoch auf Näherungen, so daß der Prozeß fast immer unumkehrbar ist und es auch schwierig ist, ihn zu automatisieren, um ausreichend gute Ergebnisse zu erhalten. Eine Sehnentoleranzbildung ist ein weitverbreitet verwendetes Verfahren zum Verringern der Anzahl diskreter Punkte in einer 2D- oder 3D-Polylinie. Als eine Zwischendatenstruktur weist sie die Nachteile auf, daß die Zwischendatenstruktur nicht die Orientierung jedes Streifens aufzeichnet, daß sie keine Unterbrechungen in den Daten aufzeichnet, sondern annimmt, daß alle Punkte durch eine Fläche verbunden sind, und daß sie keine Sprünge in den Daten, wie jene, die durch Abdeckungen hervorgerufen werden, aufzeichnet.

[0022] Die meisten Abtastungen werden heutzutage unter Verwendung eines mehrgelenkigen Arms mit einem Spitzenbezugspunkt ausgeführt. Es ist üblich, zuerst das abzutastende Objekt mit einer permanenten oder vorübergehenden Markierungsvorrichtung in der Art eines Tintenstifts oder einer Ritzvorrichtung zu markieren, um ein polygonales Netz von Splines zu erzeugen. Es wird dann an jedem Schnittpunkt des Netzes ein einziger Punkt abgetastet. Im Computer werden die Punkte zu einer Polygonalstruktur verbunden. Der Gesamtprozeß (Markieren, Abtasten und Verbinden) zur Erzeugung eines 3D-Polygonalmodells läuft bei einer typischen Rate von 1 Punkt (oder Scheitelpunkt in dem Modell) je 3 Sekunden ab. Bei manchen Implementationen wird das Netz nicht markiert, sondern es erscheint auf einem Computerbildschirm, während jeder Punkt abgetastet wird, wobei das Netzwerk bei dieser Implementation interaktiv aufgebaut wird. Dieses Verfahren ist für Modelle mit einer verhältnismäßig geringen Anzahl von Scheitelpunkten, d. h. Hunderten und Tausenden von Scheitelpunkten, geeignet. Das Verfahren ist sehr langsam, es erfordert Geschicklichkeit, Geduld und Konzentration, und es ist ein hoher Aufwand an menschlicher Arbeitszeit erforderlich, was insbesondere bei großen, detaillierten Objekten der Fall ist, bei denen 3 Wochen für das Abtasten erforderlich sein können.

[0023] Ein alternatives Verfahren zum Abtasten mit einem mehrgelenkigen Arm und einem Kontakt-Spitzenbezugspunkt wurde häufig versucht, bei dem unabhängige Punkte ohne die Hilfe eines Netzes schnell erfaßt werden. Die Punkte werden dann in ein Oberflächenerzeugungs-Softwarepaket eingegeben, welches dann ein Polygonalnetz zwischen den Punkten aufbaut. Die "Polygonisation" nicht organisierter Datenpunkte ist jedoch gewöhnlich sehr langsam, und die Geschwindigkeit nimmt stark ab, wenn die Anzahl der Punkte zunimmt. Die Ergebnisse sind gewöhnlich so schlecht, daß sie inakzeptabel sind. Gewöhnlich ist ein erhebliches Maß an Handbearbeitung der Daten erforderlich.

[0024] Gemäß der vorliegenden Erfindung ist eine Abtastvorrichtung zum Abtasten eines Objekts zum Erzeugen eines dreidimensionalen Computermodells von diesem gemäß dem vorliegenden Anspruch 1 oder 3 vorgesehen. Eine Vorrichtung zur Verwendung in einer solchen Abtastvorrichtung ist in Anspruch 2 bzw. 4 beansprucht.

[0025] Gemäß der Erfindung ist auch ein Verfahren gemäß dem vorliegenden Anspruch 5 vorgesehen.

[0026] Ausführungsformen der Erfindung werden nun nur als Beispiel mit Bezug auf die anliegenden Figuren beschrieben.

[0027] Es zeigen:

[0028] **Fig. 1** eine schematische Darstellung einer Abtastvorrichtung gemäß einer Ausführungsform der Erfindung,

[0029] **Fig. 2** eine schematische perspektivische Darstellung einer Sonde,

[0030] **Fig. 3a** eine erste Ausführungsform der Konfiguration der in einer Sonde untergebrachten optischen Elemente,

[0031] **Fig. 3b** eine Lampenkonfiguration,

[0032] **Fig. 3c** eine Alternative zur Lampenkonfiguration aus **Fig. 3b**,

[0033] **Fig. 3d** eine Graphik, in der die Intensität als Funktion des Abstands entlang der Linie A1-A2 aus **Fig. 3a** dargestellt ist,

[0034] **Fig. 4** eine zweite Ausführungsform der Konfiguration der in einer Sonde untergebrachten optischen Elemente,

[0035] die **Fig. 5a** bis **5d** ein Verfahren zum Kalibrieren der Farbe der Abtastvorrichtung aus **Fig. 1**,

[0036] **Fig. 6** ein schematisches Blockdiagramm, das das Erfassen von Farb- und Positionsdaten zeigt,

[0037] **Fig. 7** eine schematische Darstellung, die zeigt, wie die Erfassung der Farb- und Positionsdaten synchronisiert wird,

[0038] **Fig. 8** eine schematische Darstellung des Endes des mehrgelenkigen Arms der Vorrichtung aus **Fig. 1**,

[0039] **Fig. 9** eine schematische Darstellung des Drehtisches und des mehrgelenkigen Arms der Vorrichtung aus **Fig. 1**,

[0040] **Fig. 10** die Anbringung der Sonde an dem mehrgelenkigen Arm,

[0041] **Fig. 11** die Justierung der Halterung an dem

mehrgelenkigen Arm,

[0042] **Fig. 12** die Justierung der Sonde an dem mehrgelenkigen Arm,

[0043] **Fig. 13** ein lineares Bereichsbild,

[0044] die **Fig. 14a, 14b** zylindrische Bereichsbilder,

[0045] **Fig. 15** das Bereichsbild-Anordnungsverfahren,

[0046] **Fig. 16** das Oberflächennormalen-Erweiterungsverfahren,

[0047] **Fig. 17** die Struktur eines einzelnen Punkts in einem Bereichsbild,

[0048] **Fig. 18** die Darstellung eines Objekts durch drei Bereichsbilder,

[0049] **Fig. 19** das Bereichsbild-Aktualisierungsverfahren,

[0050] die **Fig. 20a** und **20b** einen ersten und einen zweiten auf einem CCD-Feld erfaßten Streifen,

[0051] die **Fig. 20c, 20d, 20e** und **20f** die jeweiligen erfaßten Datenpunkte und Ketten von Datenpunkten von dem ersten und dem zweiten Streifen aus den **Fig. 20a** und **20b**,

[0052] **Fig. 20g** anhand dieser Ketten erzeugte Polygone,

[0053] **Fig. 21** ist nun gelöscht,

[0054] **Fig. 22** eine Farbbildzuordnung,

[0055] **Fig. 23** den Zeitablauf für die Positionsinterpolation,

[0056] **Fig. 24** das Auslösen der Armpositionsmessung,

[0057] **Fig. 25** ein Objekt, auf dem sich markierte Linien befinden,

[0058] **Fig. 26a** eine an einem mehrgelenkigen Arm, der an einer horizontalen Armmaschine angebracht ist, angebrachte Sonde,

[0059] **Fig. 26b** ist nun gelöscht,

[0060] **Fig. 27** einen menschlichen Fuß, der abgetastet wird,

[0061] **Fig. 28a** Streifenabschnitte eines Rohrnetzes und eines Bretts,

[0062] **Fig. 28b** Teil-Polygonmodelle eines Rohrnetzes und eines Bretts,

[0063] **Fig. 28c** ein extrapoliertes Polygonmodell eines Rohrnetzes,

[0064] **Fig. 29a** eine Streifenabtastung und

[0065] **Fig. 29b** eine Flächenabtastung.

[0066] Wie in **Fig. 1** dargestellt ist, weist eine Abtastvorrichtung **100** einen mehrgelenkigen Arm **1** mit einer Armsteuereinheit **2** und einer Sonde **3** auf. Die Steuereinheit **2**, die eine Verarbeitungseinheit **10** aufweist, ist mit einem Computer oder einer Verarbeitungseinheit **4** und einem Farbbildschirm **7** gekoppelt. Die Sonde **3** ist auch mit einer Sondensteuereinheit **5** gekoppelt, die ebenfalls mit dem Computer **4** gekoppelt ist. Die Zwischendaten werden auf dem Farbbildschirm **7** als generierte Polygone **13** angezeigt. Die Sonde **3** liefert einen Streifen **8**, der auf ein Objekt **9** projiziert wird, das auf einem Drehtisch **14** positioniert ist. Der Streifen **8** liegt in Form einer Lichtebeine vor. Es sind auch Tasten **6** zum Steuern der Datenerfassung bereitgestellt. Eine Farb-Bildein-

fangeinrichtung **11** in dem Computer **4** ist auf einem Standardbus **12** angebracht und mit der Sonde **3** gekoppelt.

[0067] Der Computer **4**, die Sondensteuereinheit **5**, die Armsteuereinheit **2**, die Tasten **6**, die Farb-Bildeinfangeinrichtung **11** und der Bildschirm **7** sind getrennt bereitgestellt, wobei der Computer **4** und der Bildschirm **7** beispielsweise ein Personalcomputer und eine VDU sein können, wenngleich es bei manchen Anwendungen zweckmäßiger sein kann, wenn einer von ihnen oder alle an der Sonde **3** bereitgestellt sind.

[0068] Der mehrgelenkige Arm **1** und die Sonde **3** sind durch die vorstehend erörterten Steuereinheiten **2**, **5** mit dem Computer **4** gekoppelt. Der Computer **4** empfängt Informationen von dem Abtaststreifen **8**, die Position bzw. die Orientierung des Arms **1**, ausgedrückt durch die X-, Y-, Z-Koordinaten in Bezug auf die Koordinaten I, J, K der Oberflächennormalen der Sonde **3** und Farbdaten, falls erforderlich.

[0069] In Fig. 2 ist eine Ausführungsform der Sonde **3** dargestellt. Die Sonde **3** ist leichtgewichtig und elastisch, so daß sie ihre Kalibrierung selbst dann nicht verliert, wenn gegen sie gestoßen wird.

[0070] Mit Bezug auf Fig. 29a sei bemerkt, daß das strukturierte Licht vorzugsweise als eine Lichtebeine **364** projiziert wird, so daß ein Streifen **8** auf einer Betrachtungsebene **360** gebildet wird, die senkrecht zur Projektionsachse **361** der Signalerzeugungseinrichtung **362** steht und sich in dem durchschnittlichen Abstand S von der Signalerzeugungseinrichtung befindet.

[0071] Mit Bezug auf Fig. 29b sei bemerkt, daß das strukturierte Licht so projiziert werden kann, das ein Muster **363** in einem Bereich **365** einer Betrachtungsebene **360** gebildet wird, die senkrecht zur Projektionsachse **361** der Signalerzeugungseinrichtung **362** steht und sich in dem durchschnittlichen Abstand S von der Signalerzeugungseinrichtung befindet. Das Muster **363** in diesem Beispiel besteht aus einer Anzahl von Streifen, die unterschiedliche Farben aufweisen können.

[0072] Es werden zwei alternative Ausführungsformen der Sonde **3** beschrieben. Mit Bezug auf die Fig. 3a, 3b, 3c, 3d wird nun eine Ausführungsform der Sonde **3** beschrieben. Die Sonde **3** weist eine Anzahl an einer Grundplatte **20** angebrachter Komponenten auf. Ein Streifengenerator **22**, der beispielsweise eine Laserdiode enthält, liefert den Streifen **8** zur Projektion auf das abzutastende Objekt **9**. Typischerweise ist der Laser ein Laser der Klasse **2** oder weniger nach der Klassifikation CDRH 1040.11 in den USA, bzw. er weist weniger als 1 mW an Leistung bei einer Wellenlänge von 670 nm auf. Der Streifen **8** wird nominell auf irgendeinen Punkt P fokussiert. Eine Linsenanordnung **24** wird verwendet, um das Bild auf eine hochauflösende CCD-Kamera **25** zu fokussieren. Die Kamera kann unter einem Winkel orientiert werden, der die Scheimpflug-Bedingung erfüllt. Ein optisches Interferenz-Sperrfilter **26** wird ver-

wendet, um selektiv Licht mit der Wellenlänge des Streifens **8** abzubilden. Ein einfaches Kantenfilter **27** aus Glas verringert das Umgebungslicht innerhalb der Sonde.

[0073] Informationen zur Farbe der Oberfläche des Objekts können in Intensitätsskalen oder Farbskalen, wie RGB, aufgezeichnet werden.

[0074] Eine Intensitätsskalenschätzung der Farbe der Oberfläche kann durch Aufzeichnen des Werts des reflektierten Lichts des Streifens, während er auf die hochauflösende CCD-Kamera **25** abgebildet wird, an jedem Punkt erhalten werden. Ein höherer Wert weist auf eine Lichtoberfläche an diesem Punkt hin, welche einen großen Teil des projizierten Lichts streut, und ein niedriger Wert weist auf eine dunkle Oberfläche an diesem Punkt hin, welche einen großen Teil des projizierten Lichts absorbiert. Diese Hinweise können falsch sein, wie es beispielsweise auf spiegelnden Oberflächen der Fall ist, was Fachleuten bekannt ist.

[0075] Eine Schätzung der Farbe der Oberfläche kann durch eine Farbkamera **29**, die ein Farb-CCD-Feld aufweist, erhalten werden. Es ist für eine Farbabtastung erforderlich, daß das Objekt beleuchtet wird. Die Beleuchtung kann durch Umgebungslicht von äußeren Lichtquellen oder durch sich auf der Sonde befindende Lampen erfolgen. Es gibt mehrere Nachteile, die sich bei der Verwendung von Umgebungslicht nur für das Farbabtasten ergeben. Erstens ändert sich die Intensität des Umgebungslichts über nahezu jedem Objekt in einer Standardumgebung in der Art eines Raums mit Deckenbeleuchtung. Weiterhin kann es zeitaufwendig sein, eine Anzahl von Lichtquellen zu positionieren, um das Objekt gleichmäßig zu beleuchten. Drittens kann die Sonde selbst Schatten auf das Objekt werfen.

[0076] Vier Lampen **28a**, **28b**, **28c**, **28d** sind zur Beleuchtung um die Linse **31** der Kamera **29** bereitgestellt, oder es könnte eine Ringlampe **28'** verwendet werden. Diese Konfiguration wird verwendet, um jegliche Probleme mit einer Schattenbildung zu vermeiden. Die Lampen können jeweilige Rückreflektoren **32a**, **32b**, **32c**, **32d** aufweisen, sofern dies angemessen ist. Die Lampen sind so eingestellt, daß eine durchschnittliche Intensität von etwa 80–150 Lux erzielt wird, die Intensität könnte jedoch auch viel größer oder viel kleiner sein, und das Umgebungslicht wird, beispielsweise durch Abdunkeln oder Ausschalten von Deckenleuchten, erheblich unter dieses Niveau verringert. Hierdurch werden jegliche Auswirkungen von Änderungen des Umgebungslichts ausgeschaltet. Die Lampen können in Bezug auf die Kameraachse geneigt werden, um zu gewährleisten, daß Licht mit einer gleichmäßigeren Intensität im durchschnittlichen Abtastabstand auf das Objekt **9** projiziert wird. Die Lampen sollten eine geringere Größe aufweisen, um die geringstmögliche Gewichtsbelastung zu erhalten, insbesondere falls zwei oder mehr Lampen verwendet werden. Um ihre Lebensdauer zu verlängern, können sie während be-

stimmter Zeiträume, beispielsweise während die Erfassung jedes Bilds vorbereitet wird, bei einer niedrigeren Spannung betrieben werden. Wenn der Bediener eine Farbbilderfassung auslöst, kann die an die Lampen angelegte Spannung sofort auf das Maximum erhöht werden. Die Lampen werden nur für die Farberfassung eingeschaltet. Während des Prozesses der dreidimensionalen Erfassung werden die Lampen ausgeschaltet, woraus sich der zusätzliche Vorteil ergibt, daß das Signal-Rausch-Verhältnis erhöht wird. Es kann über den Lampen eine Zugangsplatte **35** bereitgestellt werden, so daß die Lampen leicht ersetzt werden können, ohne daß die Sonde geöffnet wird und riskiert wird, daß ihre Kalibrierung verlorenggeht. Zum Verbessern der Ergebnisse, wenn eine reflektierende Oberfläche abgetastet wird, wird ein polarisierendes Material **34** zwischen der Kamera **29** bzw. den Lampen **28a**, **28b**, **28c**, **28d** und dem Objekt **9** angeordnet. Um die Änderungen des projizierten Lichts zu verringern, werden Diffusoren **33a**, **33b**, **33c**, **33d** in dem Lichtweg zwischen jeder Lampe und dem Objekt **9** angeordnet, oder es werden alternativ das Lampenglas oder die Rückreflektoren entsprechend behandelt.

[0077] Mit Bezug auf **Fig. 4** wird nun die zweite Ausführungsform der Sonde **3** beschrieben. Wie auch in Zusammenhang mit der ersten Ausführungsform bevorzugt ist, wird die Grundplatte **20** mit einer entfernbaren zweiteiligen Abdeckung **21** versehen, die daran befestigt ist, um ein Gehäuse für die Komponenten der Sonde **3** festzulegen, das dazu dient, Umgebungslicht auszuschließen und die Komponenten zu schützen. Es kann eine metallische Innenbeschichtung aufweisen, um elektromagnetische Emissionen und die elektromagnetische Suszeptibilität zu verringern. Die Abdeckung ist für beide Ausführungsformen geeignet.

[0078] Die Sonde **3** gemäß der zweiten Ausführungsform kann auch die Farbe der Oberfläche des Objekts **9** erfassen. Die Farbe wird unter Verwendung eines optischen Systems erfaßt, das mit dem Lichtstreifen **8** koplanar ist. Der Hauptvorteil der Koplanarität besteht darin, daß dabei die Farbe jedes Punkts direkt bereitgestellt wird, während nicht koplanare Systeme, wie gemäß der ersten Ausführungsform, eine umfangreiche Nachverarbeitungsberechnung erfordern, um die erfaßten Farbdaten auf die erfaßten 3D-Daten abzubilden. Bei nicht koplanaren Systemen ist die Lage des Streifens in der Farbkamera wegen Fehlausrichtungen der zwei Kameras in erheblichem Maße veränderlich, woraus sich eine Ausführungsform ergibt, die zum Abtasten in zwei Durchgängen betätigt wird, nämlich 3D und Farbe an Stelle des einen Durchgangs, der durch die zweite Ausführungsform erreichbar ist.

[0079] Während der Verwendung, wobei der Streifengenerator **22** ausgeschaltet ist und die Lampe **28** eingeschaltet ist, wird eine Farbprobe **32** des Objekts **9** entlang der Richtung zurück gerichtet, in der sich der Streifen **8** befinden würde, falls der Streifengene-

rator beleuchtet werden würde, wo er durch einen halb versilberten Spiegel **30** reflektiert wird und durch eine Linsenanordnung **31** auf die Farbkamera **29** fokussiert wird.

[0080] In einer Sonde **3**, in der der Streifengenerator **22** einen weißen Streifen erzeugt, können die Farbe und die Position gleichzeitig erfaßt werden, wobei die Umgebung in diesem Fall dunkel sein müßte und eine Beleuchtung **28** nicht erforderlich wäre.

[0081] Es ist ein Nachschlageverfahren vorgesehen, um zu bestimmen, wo die Farbe aus dem rechtwinkligen Feld der Farbkamera **29**, abhängig vom Objektabstand **S** aller Punkte entlang dem Streifen **8** auszulesen ist. Mit Bezug auf **Fig. 5** sei bemerkt, daß eine Farbkamera-Nachschlagetabelle **166** eingerichtet wird, indem der Streifen an einer ausreichenden Anzahl von Punkten in einem rechtwinkligen Feld, das die Abstandsmeßtiefe und die Streifenmeßlänge abdeckt, betrachtet wird, wenn er permanent beleuchtet wird. Ein flaches Objekt **161** mit einer festen Länge ist ein Gegenstand, der für diesen Zweck verwendet werden kann, und es weist typischerweise eine weiße Oberfläche auf. Das flache Objekt **161** wird auf einem den Lichtstreifen absorbierenden Hintergrund **162** angeordnet. Die Sonde **3** und das flache Objekt **161** bewegen sich zueinander in Richtung der W-Achse, so daß die Streifen **163** abgebildet werden. Das Farbkamerabild **165** zeigt die in einem Bereich **164** des Felds gesammelten abgebildeten Streifen **163a**. Im Fall einer perfekten Koplanarität werden die abgebildeten Streifen überlagert (**163b** in **Fig. 5c**). Die Nachschlagetabelle **166** wird dann so eingerichtet, daß für einen abgetasteten Punkt **167** auf einem Objekt mit den Koordinaten **V1**, **W1** in der Nachschlagetabelle **166** eine Farbbildposition **Cx**, **Cy** vorhanden ist, welche ein Wertefeld von **Cx**, **Cy** für die V- und W-Bereiche speichert. Während des Ab tastens wird das Farbbild vor der Streifenmessung gewöhnlich abgetastet. Das Ausmaß der Nachschlagetabelle **166** kann bestimmen, wie viel von dem Farbbild **165** gespeichert werden muß, während die Punkte berechnet werden, also das Ausmaß des Bereichs **164**. Hierdurch werden die im Computer **4** erforderliche Speichermenge und die erforderliche Bandbreite für das Übertragen von Farbinformationen von der Kamera **29** in den Computer **4** reduziert, wodurch die Verwendung von kostengünstigeren Einheiten, wie der Bildeinfangeinrichtung **11**, die sich in der Sondensteuereinheit **5** oder in dem Computer **4** an einem Bus befindet, wie vorstehend erörtert wurde, ermöglicht wird. Es ist wahrscheinlich den Aufwand nicht wert, ein perfekt koplanares System aufzubauen, weil ein grob koplanares System wie vorstehend beschrieben kalibriert werden kann, um ein ebenso wirksames Ergebnis zu erzielen.

[0082] Mit Bezug auf die **Fig. 6** und **7** sei bemerkt, daß es bei koplanaren Systemen schwierig ist, die Oberflächenposition des Objekts und seine Farbe gleichzeitig einzufangen, falls der Lichtstreifen **8** eine andere Farbe als weiß aufweist. Um dieses Problem

zu lösen, können der Lichtstreifen **8** und die Farbkamera **29** ein- und ausgeschaltet werden, so daß die Farbe kurz vor oder kurz hinter der Position aufgezeichnet wird. Eine Einstellschaltungsanordnung kann bereitgestellt werden, um die Belichtungszeiten der Farbkamera **29** und des Streifengenerators **22** zu ändern und um zu gewährleisten, daß der Zwischenraum zwischen der Farberfassung und der Streifen- erfassung minimiert wird. Um dies zu erreichen, erzeugt ein Videosynchronisationsgenerator **60** ein Synchronisationssignal **61** mit Impulsen bei einer Videokamerarate, welche bei Verwendung des CCIR-Formats **50** Mal je Sekunde ist. Das Synchronisationssignal **61** wird der hochauflösenden Kamera **25** und der Farbkamera **29** zugeführt. Die Belichtungszeit der Farbkamera **29** kann unter Verwendung eines Schalters **63** manuell eingestellt werden oder mit einem elektrischen Signal ferneingestellt werden. Das Synchronisationssignal **61** wird auch in eine Standardschaltung **62** eingegeben, die den Streifengenerator **22** für einen Zeitraum nach einer anfänglichen Verzögerung einschaltet. Der Zeitraum, während dessen der Streifengenerator eingeschaltet ist, kann unter Verwendung einer Steuerung **64** manuell festgelegt werden, und die Verzögerung zwischen dem Zeitpunkt, zu dem das Synchronisationssignal **61** empfangen wird, und dem Einschalten des Streifengenerators **22** kann auch unter Verwendung einer Steuerung **65** manuell festgelegt werden. Mit Bezug auf **Fig. 7** sei bemerkt, daß das Synchronisationssignal **61** durch die Spur SYN dargestellt ist. Die Beleuchtung des Streifengenerators **22** ist durch die Spur L dargestellt. Die Beleuchtung der Farbkamera **29** ist durch die Spur C dargestellt. Die Beleuchtung der hochauflösenden Kamera **25** ist durch die Spur M dargestellt. Dies soll nur als Beispiel für das Steuern koplanarer Sonden dienen.

[0083] Mit Bezug auf **Fig. 8** sei bemerkt, daß die Sonde **3** den Streifen **8** so projiziert, daß der Meßbereich vor einem Spitzenbezugspunkt **51** beginnt, der am Ende des mehrgelenkigen Arms **1** bereitgestellt ist, und sich über einen weiteren Abstand erstreckt. Der Spitzenbezugspunkt **51** kann beispielsweise die Spitze eines Kegels, einer Kugel oder einer Rollvorrichtung in der Art eines Rollrads oder einer Rollkugel sein, oder der Punkt kann irgend etwas Ähnliches sein, was eine Spitze bereitgestellt. Gemäß der hier beschriebenen Ausführungsform ist der Spitzenbezugspunkt **51** der Mittelpunkt einer Kugel **52**. Dieser Spitzenbezugspunkt **51** ermöglicht es dem Bediener, harte Objekte durch Entlangfahren der Kugel **52** entlang dem Objekt **9** in Streifen in Kontakt mit dem Objekt **9** abzutasten. Für weiche Objekte wirkt die Kugel **52** als eine Abtastführung, und typische Anweisungen könnten darin bestehen, den Spitzenbezugspunkt **51** etwa 20 mm von dem Objekt **9** entfernt zu halten, während abgetastet wird. Auf diese Weise kann die Sonde **3** dicht genug bei dem Objekt **9** gehalten werden, damit der Streifen **8** in dem Meßbereich liegt, jedoch ohne das weiche Objekt **9** zu be-

rühren. Der Streifen **8** beginnt typischerweise 100 mm vom Spitzenbezugspunkt **51** am Ende des Arms **1** entfernt, er könnte sich jedoch viel näher befinden oder weiter weg sein, und er kann verwendet werden, um Objekte zu messen, die, vom Ende **55** der Sonde **3** gemessen, zwischen den zwei Punkten W1 und W2 liegen. Das ideale Verfahren besteht von einem Verwendbarkeitsstandpunkt darin, daß die Ebene des Streifens **8** mit der Achse **54** des letzten Abschnitts **50** des Arms **1** koaxial ist, und dies ist der Fall für einen zu einem Zweck ausgelegten Arm und eine von Hand gehaltene Sonde. Die Sonde **3** kann häufig für den Arm **1** nachgerüstet werden, und weil ein mechanischer Arm einen Durchmesser von typischerweise 20–60 mm aufweist, entsteht hierdurch ein Ausrichtungsproblem. In diesem Fall ist die Ebene des Streifens **8** nicht koaxial, sondern sie kann entweder in einer Ebene **53** parallel zur Armendachse **54** oder in einer Ebene **53a**, die unter einem Winkel zu dieser Achse **54** steht, liegen, so daß sie die Achse **54** an irgendeinem Punkt kreuzt. Durch Kreuzen der Achse **54** des Arms **1** irgendwo im Meßbereich kann die Ergonomie des Arms **1** verbessert werden, weil sich die Lichtebeine in einer einfacher verwendbaren Position befindet. Diese Überkreuzung tritt typischerweise irgendwo zwischen dem Spitzenbezugspunkt **51** und dem Ende W2 des Meßbereichs auf.

[0084] Mit Bezug auf **Fig. 9** sei bemerkt, daß die Verwendung eines von Hand gedrehten Drehtisches mehrere Vorteile aufweist. Für eine gegebene Armgröße können größere Objekte abgetastet werden. Der Bediener braucht sich nicht um das Objekt herum zu bewegen, wodurch das Abtasten physikalisch einfacher und angenehmer wird und es weniger wahrscheinlich wird, daß entweder der Bediener oder der Arm versehentlich gegen das Objekt stößt oder ein Bezugspunkt verlorengeht.

[0085] Die Position und das Koordinatensystem des Drehtisches **14** müssen in Bezug auf diejenigen des Arms **1** bekannt sein. Der Spitzenbezugspunkt **51** kann in einem Lokalisierungskegel oder einer Lokalisierungsschale **202** auf dem Tisch bei einem großen Radius angeordnet werden. Punkte werden durch die Armsteuereinheit **2** regelmäßig übertragen und im Computer **4** aufgezeichnet, wenn der Drehtisch **14** von Hand gedreht wird. Funktionen, die eine Ebene und einen Kreis durch diese Punkte anpassen, liefern vollständige Positions- und Orientierungsinformationen über den Drehtisch **14** in dem Armkoordinatensystem.

[0086] Es ist wichtig, daß während des Ab tastens der Drehtischwinkel bekannt ist. Der Drehtisch kann so ausgelegt sein, daß er präzise mechanische Ruhepositionen **206a**, **206**, **206c**, **206d**, beispielsweise alle 15 Grad, aufweist. Diese Ruhepositionen **206** wären von einem Zeiger **208** sichtbar, der den Winkel einer angebrachten Skala **209** von dreihundertsechzig Grad angibt. Der Bediener könnte den neuen Winkel jedesmal in den Computer eintippen, wenn der Drehtisch gedreht wird. Der Prozeß des Eintip-



pens eines Winkels bedeutet jedoch, daß der Bediener möglicherweise die Sonde **3** ablegen muß, wodurch das Abtasten verlangsamt wird und sich die Möglichkeit ergibt, daß vom Bediener ein Fehler gemacht wird.

[0087] Wenn eine elektrische Verbindung **204** zwischen einem Positionssensor **203** am Drehtisch **14** und dem Computer hergestellt ist, so daß der Computer entweder genau oder grob den Drehtischwinkel kennen kann, ist der Prozeß schneller und weniger fehleranfällig. Falls der Sensor **203** genau ist, wie es beispielsweise bei einem Encoder mit 10000 Linien der Fall ist, könnte der Drehtisch **14** unter einer beliebigen Orientierung positioniert werden, und sein Winkel könnte genau bekannt sein. Dies ermöglicht das Abtasten, während sich der Drehtisch dreht, wenn gleich sorgfältig vorgegangen werden muß, um sicherzustellen, daß die Dynamik nicht zu Positionsfehlern oder dazu, daß sich das Objekt in bezug auf den Drehtisch dreht, führt. Falls der Sensor **203** weniger genau ist, wie beispielsweise ein Potentiometer, könnte der Drehtisch **14** auch präzise mechanische Ruhepositionen **206** aufweisen. Hierdurch ergeben sich die Vorteile einer hohen Genauigkeit und geringerer Herstellungskosten. Jedesmal dann, wenn die Sonde **3** Daten von dem Objekt erfaßt, muß die Software prüfen, ob eine Bewegung des Drehtisches **14** vorliegt. Falls er sich bewegt haben sollte, sollten die Sondendaten bei einem weniger genauen Drehtischsensor **203** verworfen werden, bis sich der Drehtisch **14** nicht mehr bewegt. In allen Fällen sollte der Drehtisch **14** von Hand betätigt werden, so daß die Sonde nicht abgelegt werden muß. Es ist häufig der Fall, daß ein Objekt auf einem Drehtisch in regelmäßigen Inkrementen, beispielsweise 8 Abtastvorgänge alle 45 Grad, abgetastet wird. Um den Bediener beim Inkrementieren um X Grad zu unterstützen, könnten verschieden geformte und/oder gefärbte Bildzeichen alle X Grad oder bei anderen regelmäßigen Intervallen auf der Skala angeordnet werden. Typische Intervalle könnten 45, 60 und 90 Grad sein.

[0088] Wiederum mit Bezug auf **Fig. 2** sei bemerkt, daß dieses Verfahren auch mit einer Sonde **3** mit einem Spitzenbezugspunkt **51** verwendet werden kann. Dieser manuelle Drehtisch kann durch einen Motor angetrieben werden, der durch Handsteuerungen betätigbar ist.

[0089] Jedesmal dann, wenn eine Sonde **3** an dem Arm **1** angebracht wird, muß die Transformation in sechs Freiheitsgraden zwischen dem Armkoordinatensystem X, Y, Z und dem Sondenkoordinatensystem U, V, W gefunden werden, falls die Anbringung nicht mit hoher Genauigkeit wiederholbar ist.

[0090] Eine Anbringungs Vorrichtung **210**, **214** für die Sonde ist in **Fig. 10** dargestellt. Es ist eine genaue und wiederholbare geometrische Positionierung der Sonde an dem Arm erforderlich, und diese wird durch die Anbringungs Vorrichtung **210**, **214** bereitgestellt. Die Anbringungs Vorrichtung **210**, **214** weist eine mechanische Standardschnittstelle auf,

die vorzugsweise für alle Sonden und Arme verwendet werden kann und die sowohl klein und leicht ist und die leicht verwendbar ist, um die Sonde am Arm anzubringen und vom Arm abzunehmen. Die Anbringungs Vorrichtung weist eine Armseitenhalterung **210** auf, die eine flache Paßfläche **211** aufweist, welche zwei präzise bemessene Vorsprünge **212** aufweist, die sich an der Paßfläche **211** in präzisen Positionen befinden. Die Anbringungs Vorrichtung weist auch eine SONDENSEITENHALTERUNG **214** auf, welche eine flache Paßfläche **215** und zwei präzise dimensionierte Vertiefungen oder Löcher **216** aufweist, die den zwei Vorsprüngen **212** in der Armseitenhalterung **210** entsprechen. Es ist wichtig, daß die geometrische Wiederholbarkeit in der Position und der Orientierung sehr hoch ist.

[0091] Eine Standard-Anbringungs Vorrichtung zwischen jedem Arm und jeder Sonde bietet mehrere Vorteile. Wenn der Arm ohne die Sonde verwendet werden muß, muß die Sonde entfernt werden. Falls die Anbringungs Vorrichtung nicht wiederholbar ist, muß das System vor dem Gebrauch Jedesmal dann neu justiert werden, wenn die Sonde wieder angebracht wird. Typischerweise wird eine Reihe von Sonden mit unterschiedlichen Gewichten, Geschwindigkeiten, Größen und Genauigkeiten, die verschiedenen Funktionen entsprechen, bereitgestellt. Jede Sonde kann mit Justierdaten in Bezug auf das Datum der SONDENSEITENHALTERUNG **214** bereitgestellt werden, und jede Sonde kann auf diese Weise an dem Arm befestigt werden, ohne daß eine Neujustierung erforderlich wäre. Ein Benutzer kann auch einen oder mehrere verschiedene Arme haben. Um dieselbe Sonde an zwei verschiedene Arme anzupassen, braucht der Benutzer nur einen zusätzlichen Adapter für den zweiten Arm zu erwerben, der an den Arm paßt, und die Armseitenhalterung **210** der Anbringungs Vorrichtung **210**, **214** aufzunehmen. Die Armseitenanbringungs Vorrichtung **210** kann an jedem beliebigen mehrgelenkigen Arm befestigt werden.

[0092] Um die Transformation der sechs Freiheitsgrade zwischen dem Armkoordinatensystem und dem Sondenkoordinatensystem zu berechnen, kann diese entweder als eine Transformation oder als eine Multiplikation von zwei Transformationen behandelt werden, falls die genau wiederholbare Halterung als ein Zwischenbezugspunkt angesehen wird, so daß die Transformationsmatrix Tap zwischen dem Arm- und dem Sondenkoordinatensystem gleich der Transformationsmatrix Tam zwischen dem Arm- und dem Halterungs koordinatensystem, multipliziert mit der Transformationsmatrix Tmp zwischen dem Halterungs- und dem Sondenkoordinatensystem ist:

$$\text{Tap} = (\text{Tam}) \cdot (\text{Tmp})$$

[0093] Die Transformationsmatrix Tam kann auf mehrere Arten gefunden werden. Mit Bezug auf **Fig. 11** sei bemerkt, daß bei einem besonders einfachen, kostenwirksamen und praktischen Verfahren

eine Bezugsplatte **220** verwendet wird. Die Bezugsplatte **220** hat drei orthogonale flache Flächen **222** und einen Anbringungspunkt **221**, an dem die Armseitenhalterung **210** in einer genau bekannten Position in Bezug auf die orthogonalen Ebenen befestigt werden kann. Tam kann unter Verwendung der folgenden Schritte berechnet werden:

- Die Bezugsplatte **220** wird so befestigt, daß sie sich nicht in bezug auf das Armkoordinatensystem bewegen kann,
- die Armseitenhalterung **210** wird starr an dem Arm **1** befestigt (falls sie nicht bereits vorhanden ist), ohne daß die Sonde angebracht wird,
- die drei orthogonalen Ebenen **222** der Platte **220** werden durch den Spitzenbezugspunkt **51** an dem Arm gemessen, um die Position und die Orientierung der Bezugsplatte voll festzulegen,
- die Armhalterung wird dann in Übereinstimmung mit dem Anbringungspunkt **221** auf der Bezugsplatte **220** gebracht,
- die Position und die Orientierung des Arms werden aufgezeichnet,
- die Transformationsmatrix Tam wird dann anhand der bekannten Geometrie der Bezugsplatte **220** und der Messungen aus den vorhergehenden Schritten berechnet.

[0094] Das vorstehende Verfahren kann in die Hauptabtastsoftware aufgenommen werden, die mit dem Abtastsystem ausgeliefert wird, oder es kann in ein getrenntes Programm aufgenommen werden. Hieraus ergibt sich der Vorteil, daß gegenüber einer Alternative, bei der der Benutzer Tam anhand von der Software des Armherstellers ausgegebener Armpositionen manuell berechnet und die sich ergebende Tam manuell in die Haupt-Abtastsystemsoftware eingibt, viel Zeit gespart wird.

[0095] Die Sondenseitenhalterung **214** ist mit der Sonde integriert ausgebildet und bewegt sich nicht in bezug auf das Sondenkoordinatensystem. Die Transformationsmatrix Tmp wird vom Sondenlieferanten mit den Kalibrierungsdaten für die Sonde bereitgestellt.

[0096] Die direkte Berechnung von Tap unter Verwendung des Arms und des Sondenkoordinatensystems, wobei jedoch keine Zwischenhalterung beteiligt ist, kann auf vielerlei Arten ausgeführt werden. Bei den meisten Arten wird die an dem Arm angebrachte Sonde verwendet, um Daten von einem oder mehreren geometrischen Objekten zu erfassen. Das Problem hat sich als sehr schwierig erwiesen, weil viele der Standardverfahren häufig infolge inhärenter Instabilitäten, die durch verhältnismäßig kleine Fehler ausgelöst werden, ungenaue Ergebnisse entweder der Orientierungs- oder der Positionskomponenten erzeugen. Eine Methode wird beispielhaft für eine Streifensonde dargelegt:

[0097] Mit Bezug auf **Fig. 12** sei bemerkt, daß die Transformationsmatrix Tap folgendermaßen berechnet wird:

1. Das Justierungskalibrierobjekt mit drei orthogonalen Stirnflächen **230** wird so angebracht, daß die drei orthogonalen flachen Flächen **231**, **232**, **233** von der an einem Arm **1** angebrachten Sonde **3** erreichbar und zugänglich sind,
2. wenigstens drei Streifen von drei verschiedenen Orientierungen an der ersten flachen Fläche **231** werden erfaßt, wobei sich die Orientierungen in ausreichendem Maße unterscheiden müssen, um dem mathematischen Algorithmus Stabilität zu geben (in der Praxis ist ein Unterschied von wenigstens 5 Grad zwischen jeweils zweien der Streifen ausreichend),
3. diese Erfassung von drei oder mehr Streifen wird auf einer zweiten flachen Fläche **232** und einer dritten flachen Fläche **233** wiederholt und
4. die Daten von den neun oder mehr Streifen werden wiederholt verarbeitet, um Tap auszugeben.

[0098] Die Händigkeit der Koordinatensysteme des Arms **1** und der Sonde **3** wäre bekannt. Die Beziehung zwischen den Normalen zu den Oberflächen des Justierungskalibrierobjekts **230** könnte spezifiziert werden. Eine Art, auf die dies erfolgen könnte, besteht im Bezeichnen der drei Stirnflächen **231**, **232**, **233** und im Spezifizieren der Reihenfolge, in der die drei Stirnflächen abgetastet werden müssen.

[0099] Die Hauptvorteile der vorstehenden Vorrichtung und des vorstehenden Verfahrens zum Justieren der Sonde bestehen darin, daß daran erstens ein einziges Justierungskalibrier-Objekt beteiligt ist, das kostengünstig mit der erforderlichen geometrischen Toleranz herzustellen ist und verhältnismäßig leicht und kompakt ist, daß das Verfahren zweitens robust, einfach anhand geschriebener Anweisungen auszuführen und schnell ist, daß die Verarbeitung drittens in die mit dem Abtastsystem bereitgestellte Hauptabtastsoftware aufgenommen werden kann oder in ein getrenntes Programm aufgenommen werden kann, daß es viertens nicht erforderlich ist, daß zu Beginn dieses Verfahrens irgendwelche vorab vorhandenen geometrischen Informationen zur Orientierung und zur Position der Sonde in Bezug auf die Spitze des Arms vorhanden sind, so daß die Sonde beispielsweise auf der Unterseite des nach hinten weisenden Arms angebunden werden könnte und das Verfahren noch funktionieren würde, und daß fünftens, falls gegen die Sonde gestoßen wird oder sie beschädigt wird, so daß sich Tmp ändert, die Kalibrierung jedoch noch gültig ist, dieses Justierverfahren noch funktioniert.

[0100] Es ist offensichtlich, daß bei der Verwendung von Abtastsystemen zum Bereitstellen von Daten für 3D-Anwendungssoftware spezifische 3D-Bezugspunkte zusätzlich zu 3D-Flächen erforderlich sind. Einige Anwendungen, für die 3D-Flächen erforderlich sind, wobei auch 3D-Bezugspunkte erforderlich sind, sind Animationen, welche Gelenkbewegungen einschließen, bei denen ein Gelenk in Zusammenhang

mit dem 3D-Modell zu spezifizieren ist. In diesem Fall kann das Gelenk schnell durch einen oder mehrere 3D-Bezugspunkte definiert werden. Ein neues Verfahren zum Verwenden des Abtastsystems besteht darin, die Sonde **3** zum Abtasten der Oberfläche zu verwenden und den Spitzenbezugspunkt **51** zum Erfassen individueller 3D-Punkte durch Kontakt zu verwenden.

[0101] Dies kann sowohl bei Streifen- als auch bei Flächensystemen verwendet werden. Es gibt gemäß dieser Ausführungsform zwei Modi. Im ersten Modus werden einzelne Punkte jedesmal dann erfasst, wenn eine Taste angeklickt wird, und im zweiten Modus wird ein Strom einzelner Punkte von dem Zeitpunkt, zu dem eine Taste zum ersten Mal gedrückt wird, bis zu dem Zeitpunkt, zu dem sie erneut gedrückt wird, erfasst. Der zweite Modus wird gemeinhin verwendet, um wichtige Strukturmerkmalslinien, wie Stilllinien oder Fleckengrenzen, zu verfolgen.

[0102] Die Abtastvorrichtung **100** ist in der Lage, ein Objekt abzutasten und dabei ein Computermodell der Objektoberfläche unter Verwendung einer Zwischendatenstruktur zum wirksamen Speichern von Punkten an der Oberfläche des Objekts während des Abtastens, durch Erzeugen einer Ausprägung der Zwischendatenstruktur für das jeweilige Objekt und durch Steuern der Speicherung der abgetasteten Punkte in den Zwischendatenstrukturen während des Abtastens mit einem Bedienersteuersystem zu erzeugen.

[0103] Drei Beispiele dieser Zwischendatenstrukturen können Punkte oder codierte Streifen oder Bereichsbilder sein.

[0104] Punkte haben den Nachteil, daß sie unorganisiert sind und daß viele Informationen von der Struktur der Sonde erhalten werden und daß das Verfahren zu ihrer Verwendung verlorengeht, falls die 3D-Daten auf Punkte reduziert werden.

[0105] Im Fall von Streifensonden können viele Informationen erhalten bleiben, wodurch die Geschwindigkeit und die Qualität der Konstruktion eines Modells anhand Zwischendaten verbessert werden, falls eine codierte Streifen-Zwischendatenstruktur verwendet wird. Bei einer solchen Struktur werden Daten von einem Streifen zur Zeit gespeichert. Die Streifen werden in der Reihenfolge der Erfassung gespeichert. Es wird die Erfassungszeit jedes Streifens aufgezeichnet. Die Orientierung der Sonde wird für jeden Streifen aufgezeichnet. Die Rohdatenpunkte von dem Streifen können verarbeitet werden, bevor sie in der Datenstruktur gespeichert werden, um Sprung- und Unterbrechungs-Hinweiszeichen festzulegen und Probenwerte der Rohdatenpunkte zu bilden und eine Sehnentoleranz von ihnen festzulegen, um die Größe der Zwischendatenstruktur zu verringern, ohne wesentliche Informationen zu verlieren.

[0106] Im Fall von Flächensonden sind die Vorteile eines Bereichsbilds als eine Zwischendatenstruktur wohlbekannt. Diese Vorteile umfassen eine Datenstruktur, die gut zum flächenbasierten Datenerfas-

sungsverfahren passen, und die Wirksamkeit des Speicherns in einem Bild, in dem nur Z-Werte gespeichert sind.

[0107] Es kann eine Zwischendatenstruktur verwendet werden, bei der die Oberfläche eines Objekts durch eine begrenzte Anzahl linearer und zylindrischer Bereichsbilder beschrieben werden kann, welche in gewissem Maße durch die Form des Objekts gekennzeichnet sind.

[0108] Ein lineares Bereichsbild **70** wird mit Bezug auf **Fig. 13** erläutert. Das Bereichsbild **70** hat ein Koordinatensystem U, V, W und einen Punktabstand dU in U-Richtung und dV in V-Richtung. Das lineare Bereichsbild **70** enthält in seiner Kopfteildefinition seine Beziehung zum Weltkoordinatensystem X, Y, Z, also zum Armkoordinatensystem. Gemäß dieser Ausführungsform kann das lineare Bereichsbild **70** keine negativen W-Werte speichern.

[0109] Zylindrische Bereichsbilder **71**, **72** sind in den **Fig. 14a**, **14b** beschrieben. Das Bereichsbild hat ein Koordinatensystem W, R, A, wobei A ein Winkel ist. Der Abstand der Punkte ist dW in W-Richtung und dA in A-Orientierung. Die zylindrischen Bereichsbilder **71**, **72** enthalten in ihren Kopfteildefinitionen ihre Beziehungen zum Weltkoordinatensystem X, Y, Z. Gemäß dieser Ausführungsform können die zylindrischen Bereichsbilder **71**, **72** keine negativen R-Werte speichern. Die Richtung +R und die Position R = 0 eines zylindrischen Bereichsbilds definieren, ob die gespeicherten Punkte innerhalb des Bereichsbilds liegen, wie in **Fig. 14a** dargestellt ist, oder außerhalb des Bereichsbilds liegen, wie in **Fig. 14b** dargestellt ist.

[0110] Mit Bezug auf **Fig. 15** sei bemerkt, daß der Bereichsbild-Anordnungsalgorithmus einen abgetasteten Punkt nimmt und versucht, ihn durch Projizieren eines Strahls entlang der Normalen zum Bereichsbild **105** in festgelegten Bereichsbildern anzuordnen. Falls der Punkt in einem Bereichsbild einen negativen Wert hat, wie es beispielsweise beim Punkt **104** der Fall ist, wird er nicht in diesem Bereichsbild gespeichert. Falls der Punkt außerhalb der Erstreckung dieses Bereichsbilds liegt, wird er nicht in dem Bereichsbild gespeichert, es sei denn, daß das Bereichsbild erweiterbar ist, wobei der Algorithmus in diesem Fall das Bereichsbild ausreichend erweitert, um den Punkt anzuordnen. Falls an der Position des Bereichsbilds, an der der Punkt anzuordnen ist, bereits ein Punkt existiert, werden die zwei Punkte verglichen. Falls der Abstand zwischen den beiden Punkten in dem Raum außerhalb einer Toleranz d liegt, die beispielsweise durch den Fehler des Scanners gegeben ist, wird der nächstliegende Punkt **102** gespeichert und der am weitesten entfernte Punkt **101** zurückgewiesen. Falls die beiden Punkte innerhalb des Fehlers des Scanners liegen, werden ihre Werte gemittelt, und es wird der Mittelwert gespeichert.

[0111] Der Bereichsbild-Anordnungsalgorithmus ist einfach und schnell, er ist jedoch ungenau und ordnet

Punkte häufig falsch in Bereichsbildern an und verläßt sich darauf, daß sie durch einen näher gelegenen Punkt überschrieben werden. Falls das Bereichsbild sehr dicht ist, jedoch mit weniger Werten belegt ist, könnte bis zur Hälfte der Belegungspunkte falsch sein, weil die Oberflächennormale des Punkts falsch ist, wodurch das erfolgreiche Abtasten auf grobe Bereichsbilder beschränkt werden kann.

[0112] Der Bereichsbild-Anordnungsalgorithmus wird mit der Oberflächennormalenerweiterung verbessert. Der Bereichsbild-Anordnungsalgorithmus hat keine Schätzung der Oberflächennormalen des anzuordnenden Punkts, und er berücksichtigt weiterhin nicht die Orientierung der Sonde, wenn der Streifen erfaßt wird. Zum Verbessern der Bereichsbildanordnung wird die Tatsache verwendet, daß die meisten Streifen der Reihe nach abgetastet werden, und daß dabei Streifen eines nahen Vorgängers und eines nahen Nachfolgers verwendet werden. Wie in **Fig. 16** dargestellt ist, gibt es beispielsweise acht benachbarte Punkte **116** auf einem Streifen **114** und auf seinem Vorgänger **113** und seinem Nachfolger **115**, wobei diese verwendet werden können, um eine Näherung für die Oberflächennormale eines Punkts **P** zu bilden, bevor er in einem Bereichsbild angeordnet wird. Drei aufeinanderfolgende abgetastete Streifen **113**, **114**, **115** sind auf einem Objekt **111** dargestellt, und sie werden als Streifen **113a**, **114a** und **115a** auf ein Bereichsbild **112** projiziert. Der Punkt **P** mit den Koordinaten  $X_p$ ,  $Y_p$ ,  $Z_p$  auf dem Streifen **114** hat acht nahe Nachbarn **116** auf den jeweiligen Streifen **113**, **114**, **115**, wie vorstehend beschrieben wurde, und eine genäherte Oberflächennormale  $N_p$  mit den Koordinaten  $I_p$ ,  $J_p$ ,  $K_p$ . Die Sondenorientierung für den Streifen **114** ist  $N_s$  mit Koordinaten  $I_s$ ,  $J_s$ ,  $K_s$ . Durch Berechnen der Oberflächennormalen  $N_s$ ,  $N_p$  und  $N_R$ , wobei  $N_R$  die Normale des Bereichsbilds **112** ist, wird eine Auswahl von zwei entgegengesetzten Oberflächennormalen bereitgestellt, wobei die richtige diejenige ist, die anhand der Orientierung der Sonde **3** ersichtlich ist, wobei angenommen wird, daß die Änderungen in der Sondenorientierung für die drei Streifen für die Oberflächennormalenrichtung nicht wesentlich sind. Falls herausgefunden wird, daß die Oberflächennormale  $N_p$  eines Punkts **P** von der Oberflächennormalen  $N_R$  fort weist, wird der Punkt nicht auf dem Bereichsbild angeordnet. Diese Oberflächennormalenerweiterung beseitigt den größten Teil der falschen Punktanordnungen in Bereichsbildern. Bei einer praktischen Implementation werden drei Punktstreifen zwischengespeichert, bevor der erste Punktstreifen in den Bereichsbildern angeordnet wird. Die Normalenerweiterung in modifizierter Form kann auch unter Verwendung der zwei folgenden oder der zwei vorhergehenden Streifen für den ersten und den letzten Streifen verwendet werden. Wenn die drei Streifen **113**, **114**, **115** nahezu zusammenfallen, möglicherweise weil sich der Arm zu langsam bewegt, ist die Genauigkeit der Schätzung der Oberflächennormalen gering, und die Normale kann nicht verwendet

werden. Eine andere Normalenberechnung kann an Stelle der benachbarten Streifen unter Verwendung jeglicher benachbarter Punkte vorgenommen werden, die bereits in dem Bereichsbild angeordnet sind. Eine weitere Normalenerweiterung für den Bereichsbild-Anordnungsalgorithmus kombiniert sowohl die Streifen- als auch die Bereichsbilddaten zum Bereitstellen einer besseren Schätzung der Oberflächennormalen. Die an diesen Normalenerweiterungen beteiligten Berechnungen können einen Engpaß für den Abtastprozeß bilden. Der Engpaß kann überwunden werden, indem nur zwei Streifen, weniger Probenwerte (5 statt 9) oder ein schnellerer Computer verwendet wird.

[0113] Es muß eine Anzahl von Bereichsbildern definiert werden, die in dem Objektkoordinatensystem positioniert werden. Die Bereichsbilder weisen spezifische mathematische Definitionen auf. Es werden zwei grundlegende Typen von Bereichsbildern verwendet, nämlich lineare und zylindrische Bereichsbilder, wie vorstehend erörtert wurde. Ein Bereichsbild weist eine Richtung und eine Nullposition auf. Das Bereichsbild kann nur Punkte speichern, die vor seiner Nullposition liegen. Falls zwei oder mehr Flächen des Objekts auf einer Linie mit einem Punkt im Bereichsbild liegen, wird die Fläche, die der Nullposition des Bereichsbilds am nächsten liegt, im Bereichsbild dargestellt. Ein Bereichsbild kann in der Größe begrenzt oder unbegrenzt sein. Das Bereichsbild kann ein Bild mit festgelegter Dichte sein oder ein Mosaik einer Anzahl angrenzender Bilder unterschiedlicher Dichten aufweisen. Jede Gitterposition in dem Bereichsbild ist einwertig. In dem Bereichsbild werden typischerweise 4 Bytes zum Speichern eines Tiefenwerts  $Z$ , 1 bis 4 Bytes zum Speichern der Graustufe oder des Farbwerts  $I$  und 1 bis 3 Bytes zum Speichern der Orientierung  $N$  verwendet. Dies ist in **Fig. 17** dargestellt, worin gezeigt ist, wie ein einzelner Punkt dargestellt wird. Die für die Orientierung  $N$  vorgeschlagenen 3 Bytes ermöglichen nicht das Speichern einer sehr genauen Orientierung. Es könnten mehr Bytes verwendet werden, es gibt jedoch einen Kompromiß zwischen der Datenspeichergröße, der Verarbeitungszeit zum Umwandeln von Gleitkommazahl-Orientierungen in ein komprimiertes ganzzahliges Format und von diesem und der Genauigkeit. Bereichsbilder erfordern normalerweise 5 bis 11 Bytes zum Speichern jedes Punkts, wobei dies von den Anforderungen des Bedieners abhängt. Beispielsweise sind typischerweise 20 Bytes erforderlich, um einen ASCII-X-, Y-, Z-Wert zu speichern.

[0114] Es sei mit Bezug auf **Fig. 18** bemerkt, daß es für ein begrenztes Objekt **9** einer beliebigen Form möglich ist, eine endliche Anzahl von Bereichsbildern der vorstehenden Typen zu definieren, welche es für alle praktischen Zwecke ermöglichen, daß jeder beliebige Punkt auf der äußeren Fläche des Objekts **8** in einem oder mehreren der Bereichsbilder **81**, **82**, **83** gespeichert wird.

[0115] Bei Objekten mit tiefen äußeren Merkmalen,

wie dem Inneren eines Ohrs, kann es nicht möglich oder praktisch ausführbar sein, alle Teile der Außenfläche abzutasten, es ist jedoch möglich, sie theoretisch darzustellen.

[0116] Die Anzahl und die Position der bei dem Prozeß verwendeten Bereichsbilder sind derart, daß sie ausreichen, um es zu ermöglichen, einen ausreichenden Teil der Oberfläche des Objekts zu speichern, um es zu ermöglichen, daß ein ComputermodeLL mit der gewünschten Genauigkeit und den gewünschten Einzelheiten erzeugt wird.

[0117] Bei einem manuellen Prozeß können die Anzahl und die Position aller Bereichsbilder vor dem Abtasten vom Bediener festgelegt werden. Alternativ kann lediglich einer vom Bediener festgelegt werden, bevor mit dem Abtasten begonnen wird, woraufhin an irgendeinem Punkt während des Abtastens andere definiert werden. Der Bediener kann zwischen mehreren Strategien auswählen: Er kann Bereichsbilder und den Abtastbereich jeweils einzeln festlegen. Er kann eine Anzahl von Bereichsbildern festlegen und gleichzeitig abtasten. Er kann einige Bereichsbilder festlegen und abtasten, woraufhin weitere Bereichsbilder festgelegt werden und dann abgetastet wird. Falls ein Punkt abgetastet wird, der nicht in ein festgelegtes Bereichsbild paßt, wird er abgelehnt. Alternativ könnten diese abgelehnten Punkte automatisch gespeichert werden, um sie in irgendwelchen neuen Bereichsbildern anzuordnen, die der Bediener nachfolgend festlegen kann.

[0118] Eine typische Anzahl von Bereichsbildern reicht von 1 bis 20. Einige Bereichsbilder brauchen nur eine sehr geringe Größe aufzuweisen, welche gering genug ist, um einen Teil des Objekts abzudecken, der ansonsten vor der Aufzeichnung auf anderen Bereichsbildern verborgen ist. Die Dichte jedes Bereichsbilds kann schwanken, wobei ein großer, glatter Teil des Objekts beispielsweise keine hohe Punktdichte benötigt. Eine kleine, fein detaillierte Verzierung kann jedoch eine hohe Punktdichte benötigen. Jedes Bereichsbild hat eine Richtung.

[0119] Der Bediener kann den am besten geeigneten Satz vordefinierter Bereichsbilder aus einer Bibliothek von Bereichsbildsätzen auswählen. Er kann dann den Satz editieren, so daß er zu seinem Objekt paßt. Jeder neue Satz wird dann in der Bibliothek gespeichert. Ein Satz kann als ein Satz von Schablonen angesehen werden. Beispielsweise könnte für eine menschliche Form ein Bereichsbildsatz vorhanden sein, der aus 5 zylindrischen Bereichsbildern für die Gliedmaßen und den Rumpf, zusammen mit 5 linearen Bereichsbildern für den Oberteil des Kopfs bzw. der Schultern, der Hände und der Füße besteht. Für ein Auto könnten ein zylindrisches Bereichsbild für die Autokarosserie und zwei lineare Bereichsbilder an jedem Ende des Autos ausreichen. Es ist wichtig zu bemerken, daß die Achse eines zylindrischen Bereichsbilds innerhalb des abgetasteten Objekts oder eines Teils des abgetasteten Objekts liegen muß.

[0120] Ein Bereichsbild wird vom Bediener von

Hand festgelegt, indem er erstens den geeigneten Bereichsbildtyp auswählt, nämlich zylindrisch oder linear, und zweitens die Sonde anordnet, um die gewünschte Position und Orientierung des Bereichsbilds zu erzielen, und sie unter Verwendung des Bedienersteuersystems auswählt. Für ein zylindrisches Bereichsbild könnte die Sonde positioniert werden, um zuerst die Position und die Richtung der Achse zu erzielen und um dann den maximalen Radius zu erzielen.

[0121] Mit Bezug auf **Fig. 19** wird nun ein Ableitungsverfahren zum Aktualisieren von Bereichsbildern anhand der anderen registrierten Bereichsbilder vorgestellt, wobei es sich auch um ein neues Verfahren handelt. Das Ableitungsverfahren durchläuft jede Feldposition in dem Bereichsbild **121**, die zu aktualisieren ist. Der Ableitungsalgorithmus kann Positionen aktualisieren, die entweder keinen Wert haben oder einen Wert mit einer Oberflächennormalen haben, die einen gegebenen Wert übersteigt, oder einen weniger steilen Wert oder eine Kombination von diesen nach den Anforderungen des Bedieners haben. Falls eine Position im Bereichsbild **121** zu aktualisieren ist, wird diese Position als ein Normalenstrahl **126** auf alle anderen Bereichsbilder **120**, **125** nacheinander einzeln projiziert. Falls der Strahl ein anderes Bereichsbild **120** schneidet, wird das lokale dreieckige Oberflächenelement, durch das der Strahl zuerst hindurchtritt, auf der Oberfläche **123** lokalisiert und aufgebaut. Der Wert 124 am Schnittpunkt des Strahls **126** und des dreieckigen Elements **122** wird dann abgeleitet und im gerade aktualisierten Bereichsbild angeordnet. Falls der Strahl mehrere Bereichsbilder **120**, **125** schneidet, werden die abgeleiteten Werte von den Bereichsbildern gemittelt, nachdem Ausreißer entfernt worden sind. Ausreißer werden unter Verwendung einer Toleranz in der Art des Fehlers der Abtasteinrichtung entfernt. Der ursprüngliche Wert (falls er existiert) in dem aktualisierten Bereichsbild **121** könnte in diesem Prozeß des Entfernens von Ausreißern und Mitteln aufgenommen werden.

[0122] Das Ableitungsverfahren wird insbesondere verwendet, wenn ein zusätzliches Bereichsbild in einem späteren Stadium im Abtastprozeß addiert wird oder wenn Bereichsbilder einzeln nacheinander festgelegt bzw. abgetastet werden. Dieses Verfahren ermöglicht es, daß Oberflächenbereiche, die nahezu orthogonal zum Bereichsbild stehen, also fast senkrechte Wände sind, gegenüber Daten, die in anderen Bereichsbildern gespeichert sind, wohldefiniert sind. Hierdurch wird ein besserer Punktsatz zum Ausführen der Polygonisierung eines Bereichsbilds bereitgestellt, woraus sich ein genaueres polygonales Netzwerk ergibt und der Polygonisierungsprozeß vereinfacht wird.

[0123] Die Sonde **3** liefert Daten, die auf dem Anzeigebildschirm **7** als eine generierte polygonale Fläche **13** in Echtzeit oder mit einer annehmbaren Verzögerung angezeigt werden, so daß der Benutzer den An-

zeigebildschirm **7** betrachten kann und die Rückkopplung von der generierten Fläche verwenden kann, um die Bewegung der Sonde **3** zu führen. Echtzeit ist in Zusammenhang mit der Sichtbarmachung als eine Operation definiert, bei der mit einer Verzögerung reagiert wird, die klein genug ist, um für einen Bediener beim normalen Gebrauch annehmbar zu sein. Die Sonde **3** könnte eine Streifensonde oder eine Flächensonde sein. Wenn die Sonde 3D-Informationen und Farbinformationen erfaßt, können die Farbinformationen auf das 3D-Modell abgebildet werden, um es zu strukturieren, was nachstehend erörtert wird.

[0124] Die anzuzeigende Oberfläche wird für Streifensonden angezeigt, wobei ein zusätzlicher Streifen zur Zeit verwendet wird. Mit Bezug auf die **Fig. 20a** bis **20g** sei bemerkt, daß ein Streifen **301**, während er erfaßt wird, unter Verwendung von einem von mehreren gemeinhin verwendeten Verfahren in eine begrenzte Kette **303** von 3D-Punkten **302a**, **302b** und Hinweiszeichen **304**, **305** im Weltkoordinatensystem X, Y, Z umgewandelt wird, wobei die zuvor erhaltenen Kalibrierungs- und Justierdaten für die Sonde **3** verwendet werden. Die maximale Anzahl von Punkten gleicht gewöhnlich der Anzahl der Zeilen **281** oder der Anzahl der Spalten **282** in dem CCD-Feld **25**, abhängig von der Orientierung der CCD in der optischen Einrichtung. In dieser Offenbarung wird auf Zeilen Bezug genommen, sie kann jedoch gleichermaßen auch auf Spalten oder irgendeine andere Art des Organisierens der von der Kamera aufgezeichneten Daten angewendet werden. Wenn der Streifen eine Zeile kreuzt, kann die Position in dem CCD-Feld gewöhnlich durch eines von mehreren üblicherweise verwendeten Verfahren bis zur Genauigkeit unterhalb eines Pixels berechnet werden. Falls für eine oder mehrere benachbarte Zeilen keine Daten vorhanden sind, wie es bei den Fehlpositionen **302e**, **302f** (nicht dargestellt) der Fall ist, wird ein "Unterbrechungs"-Hinweiszeichen **304** in der Zeichenkette ausgegeben, um eine Unterbrechung in der aufgezeichneten Oberfläche anzugeben. Falls es in dem Bereich oberhalb eines Maximalwerts, der für die Abtastauflösung der Sonde **3** geeignet festgelegt ist, wie es beispielsweise zwischen **302j** und **302k** der Fall ist, eine erhebliche Sprungdiskontinuität gibt, wird ein "Sprung"-Hinweiszeichen **205** in die Kette von 3D-Punkten ausgegeben, um entweder eine vertikale Wand in Bezug auf die Sondenorientierung oder eine verdeckte Oberfläche anzugeben. Die Zeichenkette **303** wird gefiltert, um die Anzahl der Punkte zu verringern, während der größte Teil der Informationen wirksam übertragen wird. Der Zweck des Filterns besteht darin, die für die Oberflächengenerierung verarbeitete Datenmenge zu verringern und dadurch die Geschwindigkeit des Generationsprozesses bei minimaler Beeinträchtigung der Oberflächenqualität zu erhöhen. Das erste Filterungsverfahren besteht darin, einige der Streifen zu überspringen. Ein anderes Verfahren besteht darin, Proben der Zeilen zu bilden,

beispielsweise jede n-te Zeile herauszugreifen. Ein drittes Verfahren besteht darin, eine Sehnentoleranz aller Punkte in dem Streifen zu bilden und die Punkte zu verwerfen, die überschüssig sind und innerhalb der Toleranz liegen. Wenn die Computergeschwindigkeit begrenzt ist, sind das erste und das zweite Filterungsverfahren wegen ihrer Einfachheit und weil die sich ergebenden regelmäßigen Gitterpunkte regelmäßige Polygone erzeugen, die auf der Anzeige im Gegensatz zu langen dünnen Polygonen gut aussehen, die sich aus einem Sehnentoleranzprozeß ergeben könnten, der sich schnell ändernde Oberflächennormalen aufweisen kann, bevorzugt, falls die Datenpunkte infolge von Ungenauigkeiten in der Sonde und dem Arm etwas rauschbehaftet sind und auf dem Bildschirm einen unattraktiven Orangeschaleneffekt zeigen können. Der gleiche Prozeß wird für einen zweiten Streifen **306** wiederholt, der Datenpunkte **307** erfaßt, woraus sich eine zweite Kette **308** von 3D-Werten **307a**, **307b** usw. und Hinweiszeichen ergibt. Eine dreieckige oder quadratische Polygone aufweisende Fläche wird dann zwischen den zwei Ketten **303** und **308** konstruiert, woraus sich eine Kette von Polygonen **309** ergibt. Die Polygonkette wird dann durch eine Bildaufbereitungsvorrichtung angezeigt. Die Bildaufbereitungsvorrichtung kann die vorstehenden angezeigten Polygone, den Betrachtungspunkt und das Beleuchtungsmodell berücksichtigen, oder dies kann nicht der Fall sein.

[0125] Falls eine Farbe für ein Polygon aufgezeichnet worden ist, können die Farbinformationen auf das Polygon abgebildet werden. Der genaue Abbildungsalgorithmus hängt vom Format der Roh-Farbinformationen ab, welches von der Konstruktion der Sonde abhängt. Die Roh-Farbinformationen können Punkt-, Linien- oder Flächenproben einschließen. Die Roh-Farbinformationen können vor der Abbildung unter Verwendung kolorimetrischer Kalibrierungsdaten und Intensitätskalibrierungsdaten angepaßt werden. Während des Abbildungsprozesses können die Farbinformationen in Bezug auf den Abstand zwischen der Sonde und dem Polygon am Farberfassungspunkt und in Bezug auf die Orientierung des Polygons zur Sonde am Erfassungspunkt eingestellt werden. Die Grundlage für die Einstellungen ist ein Satz für jede einzelne Sonde ausgeführter Kalibrationsprozeduren.

[0126] Der Betrachtungspunkt für die dargestellte Oberfläche kann eine konstante Position, einen konstanten Zoom und eine konstante Orientierung im Weltkoordinatensystem des Objekts aufweisen, so daß die dargestellte Oberfläche anwächst, wenn die Daten erfaßt werden, während die Sonde bewegt wird. Der Betrachtungspunkt wird vor Beginn des Ab tastens entweder mit einer Eingabevorrichtung in der Art von Tasten an dem Arm, Fußpedalen, einer Maus und einer Tastatur oder unter Verwendung der Sonde zum Bestimmen des Betrachtungspunkts festgelegt. Alternativ kann der Betrachtungspunkt eine konstante Position, einen konstanten Zoom und eine kon-

stante Orientierung im Sondenkoordinatensystem aufweisen, so daß die Oberfläche in regelmäßigen Intervallen jedesmal dann komplett neu generiert wird, wenn die neue Oberfläche angezeigt wird, während sich die Sonde bewegt, wobei die Daten in den regelmäßigen Intervallen erfaßt werden, die bei einer annehmbaren Echtzeitrage von beispielsweise 25 Darstellungen je Sekunde oder weniger liegen. Alternativ kann der Betrachtungspunkt im Weltkoordinatensystem eine konstante Position, einen konstanten Zoom und eine konstante Orientierung aufweisen, wobei die dargestellte Oberfläche anwächst, wenn die Daten erfaßt werden, welche bei einem Bedienerbefehl, beispielsweise durch Drücken einer Taste oder eines Fußpedals oder in regelmäßigen Zeitintervallen von beispielsweise alle 10 Sekunden, vollständig zu denjenigen des Sondenkoordinatensystems aktualisiert werden. Die verschiedenen Verfahren zum Aktualisieren des Betrachtungspunkts weisen, abhängig von der Größe und vom Typ des abgetasteten Objekts und der Geschwindigkeit des Computers beim Neuberechnen der Oberflächenanzeige anhand eines anderen Betrachtungspunkts, verschiedene Vorteile auf.

[0127] Wiederum mit Bezug auf **Fig. 2** sei bemerkt, daß die Anzeige **7** so an der Sonde **3** angebracht werden kann, daß sich die generierte Oberfläche **13** oder ein anderes dargestelltes Bild mit der Sondenbewegung bewegt. Die Anzeige **7** könnte vor den Augen des Bedieners als Teil einer Frontprojektionsanzeige angebracht werden, die es dem Bediener auch ermöglichen kann, seine reale Umgebung sowie die generierte Oberfläche **13** zu sehen, oder dies kann nicht der Fall sein, oder sie kann an einer anderen Stelle angebracht werden. Es wurde bei der praktischen Verwendung herausgefunden, daß der Bediener die generierte Oberfläche **13** auf der Anzeige **7** betrachtet, während das Abtasten erfolgt, weil dies den wichtigen Vorteil hat, zu gewährleisten, daß das gesamte Objekt abgetastet wird. Bei manchen Anwendungen, wie beim Abtasten großer Objekte oder bei Verwendung eines Drehtisches zum Drehen des Objekts kann das Betrachten der Anzeige **7** als ein großer Anzeigebildschirm, der sich auf einer Werkbank befindet, vorteilhaft sein. Bei anderen Anwendungen, beispielsweise beim Abtasten eines kugelförmigen Objekts, ist ein Anzeigeschirm an der Sonde **3** vorteilhaft, weil sich der Bediener mit der Sonde bewegt. Bei einer ausreichenden Qualität der Frontprojektionsanzeige und wenn keine negativen Auswirkungen, wie Übelkeit, auftreten, kann eine Frontprojektionsanzeige für fast alle Anwendungen am besten geeignet sein, weil sie am direktesten eine Rückkopplung an den Bediener bereitstellt.

[0128] Wiederum mit Bezug auf **Fig. 2** sei bemerkt, daß es bereits technisch möglich ist, die Anzeige **7** mit der Sonde **3** zu integrieren, weil beispielsweise ein Farb-LCD-Bildschirm klein, leichtgewichtig, in Echtzeit arbeitend und flach ist, während er eine ausreichende Auflösung zum Generieren der Oberfläche

aufweist, so daß der Bediener sehen kann, was abgetastet worden ist und was nicht. Eine an der Sonde angebrachte Anzeige könnte in einer oder in zwei Achsen in Bezug auf die Sonde neigbar sein. Die Fähigkeit zum Neigen der Anzeige in Bezug auf die Sonde kann dem Bediener eine verbesserte Fähigkeit geben, in Räumen mit einem schlechten Sichtzugang abzutasten. Die Tasten **6** an der Sonde können zum Navigieren in Menüs und zum Auswählen aus Menüs verwendet werden.

[0129] Mit zunehmender und kompakterer zur Verfügung stehender Rechenleistung wird es möglich werden, den Computer **4** in die Sonde **3** aufzunehmen und die Anzeige **7** an der Sonde anzubringen. Die Sonde könnte einen Speicher **262** aufweisen, der sowohl ein dynamischer Speicher als auch ein magnetischer Speicher in der Art eines CD-ROMs oder einer digitalen Videoplatte (DVD) sein könnte. Die Sonde könnte eine lokale Stromquelle **260** in der Art von Batterien aufweisen.

[0130] Es existiert eine Anzahl verschiedener Technologien für Flächensonden einschließlich binärer Stereo-, photometrischer Stereo-, Flugzeit-, Moire-Interferometrie- und strukturierter Lichtsysteme. Die beim Gebrauch bei industriellen Anwendungen am weitesten verbreiteten Systeme sind das Flugzeitsystem, das Moire-System und das strukturierte Lichtsystem. Verschiedene Flächensondentechnologien haben verschiedene Vorteile und Nachteile für das manuelle Abtasten.

[0131] Bei Flugzeitsystemen wird ein modulierter Laserfleck verwendet, um eine Szenerie durch die Phasenverschiebung zwischen dem ausfallenden und dem reflektierten Strahl zu messen, die proportional zur Entfernung des Objektpunkts ist. Ein vollständiges Bereichsbild wird durch Abtasten des gesamten interessierenden Bereichs erfaßt. Für eine kleine Fläche ist diese Technik vorteilhaft, weil es sich um eine Sichtlinientechnik handelt, wenngleich die Genauigkeit im allgemeinen in der Größenordnung von 1–2 mm liegt, es sei denn, es werden mehrere Messungen an jedem Punkt vorgenommen, wodurch die Abtastgeschwindigkeit erheblich verringert wird. Sie ist dann zu langsam.

[0132] Bei Moire-Systemen werden Gitter vor Projektions- und Betrachtungsoptiken verwendet, um ein Interferenzmuster zu erzeugen, das sich in Abhängigkeit von lokalen Änderungen der Höhe des Objekts ändert. Absolutmessungen und Messungen über Unstetigkeiten sind nur möglich, indem mehrere Messungen mit unterschiedlichen Gitterkonfigurationen oder aus verschiedenen Projektionswinkeln vorgenommen werden. Für Messungen der relativen Höhe bieten diese Systeme eine hohe Genauigkeit. Es ist demgemäß zu problematisch, Absolutmessungen zu erhalten.

[0133] Mit Bezug auf **Fig. 29b** sei bemerkt, daß strukturierte Lichtsysteme in vielen Familien auftreten und auf der Projektion eines Lichtmusters und auf dem Betrachten außerhalb der Achse des Projekti-

onswinkels beruhen. Synchron abgetastete Lasertriangulationssonden können rasterförmig über eine 2D-Fläche getastet werden. Eine Laserstreifen-Triangulationslinie kann in einer Richtung zum Erzeugen von Flächenmessungen getastet werden. Das Abtasten kann mechanisch oder elektronisch erfolgen. Mehrere Laserstreifen **363** können auch gleichzeitig über ein Objekt projiziert werden, um die gleiche Wirkung wie einen getasteten Streifen zu erhalten, es ergibt sich hierbei jedoch der Nachteil, daß es bei einem einzigen Bild nicht möglich ist, zwischen den Streifen zu unterscheiden.

[0134] Die Nachteile der zuvor beschriebenen Systeme werden durch die gleichzeitige Projektion farbcodierter Lichtstreifen überwunden, und dies ist die bevorzugte Ausführungsform. Jeder Streifen weist eine Farbe auf. Jede Farbe kann zu einer diskreten Wellenlänge gehören, die beispielsweise durch eine Anzahl verschiedener Laserdioden bereitgestellt wird. Es können entweder alle Farben einzeln auftreten, oder es kann sich eine kleine Anzahl von Farben wiederholen, wobei die Wiederholung einer kleinen Anzahl von Farben zu Mehrdeutigkeiten führen kann, falls Streifen derselben Farbe nicht ausreichend getrennt werden.

[0135] Weil ein Arm als der Positionssensor verwendet wird, könnte die Sonde mit einer daran angebrachten Anzeige ihre Leistung entlang einem Kabel empfangen, welches dem Weg des Arms folgen kann, und der Computer kann sich in der Basis des Arms befinden, wodurch das Gewicht der Sonde reduziert werden würde und die Ermüdung des Bedieners verringert werden würde.

[0136] Es gibt verschiedene Methoden zum automatischen Polygonisieren von Zwischendaten zur Bildung eines 3D-Polygonalmodells. Es werden zwei Methoden beschrieben, nämlich eine Streifenpolygonisation und eine Bereichsbildpolygonisation.

[0137] Die Streifenpolygonisation von Zwischendaten zum automatischen Erzeugen eines Polygonalmodells wird für eine Streifen-Abtastvorrichtung beschrieben. Die folgende Beschreibung erfolgt anhand eines Beispiels und weist die folgenden Schritte auf:

1. Es werden die Zwischendaten in der Reihenfolge, in der sie abgetastet wurden, einschließlich der Sondenorientierung für jeden Streifen, genommen. Für eine Streifensonde bestehen diese typischerweise aus einer Anzahl benachbarter Streifen mit gelegentlichen Unstetigkeiten, die beispielsweise auftreten, wenn der Abtastprozeß unterbrochen wird oder ein Drehtisch gedreht wird oder die Abtastrichtung umgekehrt wird. Die Zwischendaten liegen vorzugsweise in Form eines codierten Streifens vor, wie vorstehend beschrieben wurde.

2. Die Daten werden in Streifen ähnlicher Sondenorientierungen und ohne Unstetigkeiten gruppiert. Eine annehmbare Abweichung der Sondenorientierung in einer Datengruppe kann zehn Grad betragen. Die durchschnittliche Normale für jeden

Streifensatz wird spezifiziert. Eine neue Gruppe wird jedesmal dann eingeleitet, wenn eine Unstetigkeit auftritt oder wenn sich die Sondenorientierung unannehmbar ändert.

3. Falls es nicht bereits in den Zwischendaten erfolgt ist, werden die Streifen in jeder Gruppe unter Verwendung einer Sehnentoleranzroutine gefiltert, um die Anzahl der Punkte zu verringern und die Positionen der Bruch- und Sprung-Hinweiszeichen aufrechtzuerhalten.

4. Es wird ein 2,5D-Polygonisationsverfahren zum Polygonisieren jeder Gruppe verwendet. Dies führt zu einer Anzahl von 2,5D-Polygonalgittern. In jedem der Gitter kann ein Loch auftreten. Das Verfahren beseitigt verdeckte Flächen hinter Flächen, die sich aus Abweichungen der Sondenorientierung innerhalb der Gruppe ergeben.

5. Es wird ein Polygongitter-Integrationsverfahren in der Art eines impliziten Oberflächenverfahrens verwendet, um die 2,5D-Polygonalgitter in ein Computermodell zu integrieren, das ein oder mehrere 3D-Polygonalgitter aufweist.

6. Falls erforderlich, wird die bekannte Grundebene des während der Abtasteinrichtung spezifizierten Objekts verwendet, um den unteren Teil des Modells automatisch zu schließen, an dem das Objekt nicht abgetastet werden konnte, weil es auf einem Tisch oder Drehtisch lag.

7. Falls erforderlich, wird eine allgemeine Schließfunktion verwendet, um alle Löcher in dem Modell automatisch zu schließen.

8. Falls erforderlich, wird eine Glättungsfunktion verwendet, die so festgelegt ist, daß durch bekannte Ungenauigkeitsniveaus beim 3D-Abtastprozeß erzeugte Merkmale herausgeglättet werden und Strukturmerkmale, die größer sind als die Ungenauigkeit des Systems, aufrechterhalten werden.

9. Das interne Polygonformat wird in eine Ausgangsdatei eines gemeinhin verwendeten Polygondateiformats, wie DXF, umgewandelt.

[0138] Die Bereichsbildpolygonisation von Zwischendaten zum automatischen Erzeugen eines Polygonalmodells ähnelt der Streifenpolygonisation. Jedes Bereichsbild ist im wesentlichen eine Gruppe von Streifen mit derselben Oberflächennormalen. Die vorstehenden Schritte **1** und **2** sind daher nicht erforderlich. Es gibt zwei Methoden zum Ausführen der Entsprechung des vorstehenden Schritts **3**. Bereichsbildaten können, wie in Schritt **3** beschrieben, als eine Reihe von Streifen mit einer Sehnentoleranz versehen werden, und der Polygonisationsprozeß wird mit den Schritten **4** bis **9** fortgesetzt, wie es erforderlich ist. Bei der zweiten Methode können, wenn die größere Struktur eines Bereichsbilds über eine Gruppe von Streifen gegeben ist, die Schritte **3** und **4** kombiniert werden, und es kann ein Bereichsbild-Toleranzalgorithmus mit einem 2,5D-Polygonisationsalgorithmus kombiniert werden, und der Polygonisati-



onsprozeß kann mit den Schritten **5** bis **9** fortgesetzt werden, wie es erforderlich ist.

[0139] Flächen-Abtastvorrichtungen geben gewöhnlich Bereichsbilder aus. Im allgemeinen ist eine Bereichsbildpolygonisation besser für Flächen-Abtastvorrichtungen geeignet, und eine Streifenpolygonisation ist besser für Streifen-Abtastvorrichtungen geeignet. Falls die Zwischendatenstruktur aus Bereichsbildern besteht, funktioniert die Bereichsbildpolygonisation unabhängig davon, ob jedes Bereichsbild einen bestimmten Datenerfassungsmoment betrifft oder Teil einer definierten Bereichsbildstruktur ist, die durch die Form des Objekts gekennzeichnet ist.

[0140] Die Kombination von Farbdaten zu einem 3D-Modell ist als Strukturabbildung bekannt.

[0141] Bevor Roh-Farbdaten in Form von Farbbildern einer Strukturabbildung auf das 3D-Modell unterzogen werden können, müssen sie zuerst durch verschiedene Kalibrierungen korrigiert werden.

[0142] Eine wichtige Kalibrierung besteht in der geometrischen Kalibrierung der Farbkamera und im Finden der Justiertransformation der Farbkamera in das kalibrierte 3D-Meßsystem in der Sonde. Ohne diese Kalibrierungen/Justierungen erzeugen benachbarte Farbproben, wenn sie gemeinsam abgebildet werden, sichtbare Fehler. Der Zweck dieser Kalibrierungen besteht darin, die geometrischen Fehler viel kleiner zu machen als jene der Armgenauigkeit. Die erste geometrische Kalibrierung besteht darin, die Linsenverzerrung zu entfernen, wobei hierfür auf der Grundlage der Abbildung geometrischer Objekte bekannter Größe und durch Extrahieren von Pixelkoordinaten unter Verwendung von Standard-Bildverarbeitungstechniken Standardmittel verwendet werden. Die zweite geometrische Kalibrierung besteht darin, das Kameramodell zu erzeugen, wobei ein einfaches Stiftlochmodell oder ein komplexeres Modell verwendet werden kann. Hierfür werden auf der Grundlage der Abbildung geometrischer Objekte bekannter Größe in verschiedenen Abständen und durch Extrahieren von Pixelkoordinaten unter Verwendung von Standard-Bildverarbeitungstechniken Standardmittel verwendet. Die dritte geometrische Kalibrierung besteht darin, die Justiertransformation zu erzeugen, wofür ein Verfahren auf der Grundlage einer 3D-Abbildung und einer Farabbildung geometrischer Objekte bekannter Größe unter Verwendung der Sonde entwickelt wurde. Für alle drei Verfahren wird eine dreiachsige computergesteuerte Maschine verwendet, um genaue Entfernungen zu gewährleisten. Die Konstruktion der Sonde muß geometrisch stabil genug sein, so daß diese Transformation nur selten neu berechnet wird, beispielsweise nachdem die Sonde fallengelassen wurde oder beschädigt wurde.

[0143] Ein großer Teil der Wirkung der Entfernung von der Sonde bis zum Objekt auf die aufgezeichnete Lichtintensität kann herauskalibriert werden. Eine diffuse, flache, weiße Oberfläche wird an einer Anzahl

verschiedener Abstände von der Sonde zur Oberfläche senkrecht zur Kameraachse abgebildet. Die Abstände werden so gewählt, daß der gesamte Abtastbereich vom nächstgelegenen Punkt zum am weitesten entfernten Punkt abgedeckt wird. Die in der Kamera aufgezeichneten Schwankungen der mittleren Intensität werden verwendet, um die Sonde mit der Entfernung zu kalibrieren. Diese Kalibrierungsdaten werden verwendet, um die aufgezeichneten Farbdaten zu korrigieren, wenn ein Objekt abgetastet wird, so daß alle Farbdaten zu einem bekannten Entfernungsäquivalent korrigiert werden.

[0144] Ein großer Teil der Wirkung der Neigung der Oberfläche gegenüber der Kameraachse auf die Farbqualität kann entfernt werden, die Wirksamkeit hiervon hängt jedoch zumindest vom Reflexionsgrad der Oberfläche für jede Farbe ab. Eine diffuse, flache, weiße Oberfläche wird unter verschiedenen Winkeln zur Kameraachse unter einem festen Abstand von der Sonde zur Oberfläche abgebildet. Die Winkel werden zu dem Punkt ausgewählt, an dem eine erhebliche Abweichung vom Lambertschen Modell auftritt. Die Abweichungen der in der Kamera aufgezeichneten mittleren Intensität werden verwendet, um die Sondenintensität mit dem relativen Oberflächenwinkel zur Sonde zu kalibrieren. Diese Kalibrierungsdaten werden verwendet, um die beim Abtasten eines Objekts aufgezeichneten Farbdaten zu korrigieren, so daß alle Farbdaten zu einem Normalenäquivalent korrigiert werden.

[0145] Eine kolorimetrische Standardkalibrierung wird unter Verwendung von Bezugsfarben in der Art von Macbeth-Diagrammen ausgeführt, die unter einem bekannten Abstand von der Sonde senkrecht zur Achse der Farbkamera angebracht sind. Es werden Korrekturen an einem üblicherweise verwendeten Farbstandard, wie CIE, vorgenommen. Die einzelnen Pixel in der Kamera können farb- und intensitätskorrigiert werden.

[0146] Einige der vorstehenden Kalibrierungen ändern sich sehr wenig zwischen mit der gleichen Konstruktion hergestellten Sonden. Dies liegt wahrscheinlich an engen Herstellungstoleranzen. Die Kalibrierungsinformationen können in die Software aufgenommen werden, wie beispielsweise Konstanten oder Tabellen oder Gleichungen für die Sondenkonstruktion. Es könnten andere Kalibrierungen jedesmal dann ausgeführt werden, wenn das Abtastsystem verwendet wird, wobei beispielsweise beim Abtasten einer weißen Oberfläche in einer bekannten Entfernung die Lampenintensität in Bezug auf die Intensität, als die Lampenkolben neu waren, festgelegt wird.

[0147] Mit Bezug auf **Fig. 22** sei bemerkt, daß es mehrere Verfahren zum Abbilden von Farbbildern **320** auf ein 3D-Modell **324** zur Bildung von Strukturabbildungen gibt. Oberflächenelemente auf dem 3D-Modell können flache Polygone oder Elemente einer Oberflächenform hoher Ebene sein. Ein Abbildungsverfahren für Farbbilder weist die folgenden Schritte auf:

1. Jedes Farbbild **320** wird unter Verwendung von Kalibrierungsdaten und von geometrischen Daten korrigiert.

2. Für jedes Oberflächenelement **321** wird das Farbbild, dessen Normale **323** hinsichtlich der Orientierung der Normalen **322** des Oberflächenelements **321** am nächsten liegt, ausgewählt (das Masterbild), und die Strukturabbildungskordinaten für dieses Oberflächenelement gehen in die Abbildung dieses Oberflächenelements auf dieses Masterbild ein. Die nächstgelegene Bildnormale ist in diesem Fall diejenige von **320a**.

3. Es werden dann die anderen Farbbilder, die auf das Oberflächenelement abgebildet werden, verarbeitet. Falls die Oberflächennormalendifferenz zwischen dem Oberflächenelement und einem Farbbild oberhalb einer bestimmten Toleranz liegt, wird dieses Bild ignoriert. Dies liegt daran, daß die in dem Bild erhaltene Farbqualität erheblich verschlechtert wird, wenn die Oberflächenorientierung des Objekts in bezug auf das Bild sehr steil wird. Der Teil des Masterbilds, auf den das Oberflächenelement abgebildet wird, wird dann durch einen gewichteten Mittelwert aller Farbbild-Abbildungsteile verbessert. Die Grundlage dieser Gewichtung ist der Kosinus der Differenz in der Oberflächennormalen zwischen dem Oberflächenelement und dem Farbbild.

[0148] Die Vorrichtungen und die Verfahren, die vorstehend erörtert wurden, erzeugen jeweils einzeln eine verbesserte Farbkopie des 3D-Modells und einen erheblichen kommerziellen Vorteil.

[0149] Es werden Methoden zum Verbessern der Abtastzeit und zum sich daraus ergebenden Verringern geometrischer Fehler offenbart.

[0150] Wenn kein elektrisches Auslösen möglich ist (was gemäß dieser Ausführungsform nicht der Fall ist), wird das folgende Verfahren zum Verringern der Ungenauigkeit verwendet, die durch die Zeitdifferenz zwischen der Aufzeichnung der Armposition und dem Erfassen des Rahmens hervorgerufen wird:

1. Mit Bezug auf **Fig. 23** wird die Armposition vor dem Erfassen des Rahmens aufgezeichnet B, und die Zeit  $t_1$  hierfür wird aufgezeichnet.

2. Ein Rahmen wird angefordert.

3. Wenn der Rahmen erfaßt worden ist C, wird die Zeit  $t_2$  aufgezeichnet. Es gibt eine bekannte Verzögerung  $T/2$  mit einer geringen Veränderlichkeit gegenüber der Mitte der Rahmenerfassung zu dieser Zeit  $t_2$ , die in hohem Maße von der Verschlussöffnungszeit  $T$  abhängt.

4. Die Armposition nach A wird aufgezeichnet, und die Zeit  $t_3$  hiervon wird aufgezeichnet.

5. Die Armposition in der Mitte des Rahmens wird durch Interpolieren zwischen den zwei Armpositionen B, A unter Verwendung der Zeit  $(t_2 - T/2)$  in der Mitte der Rahmenerfassung in sechs Freiheitsgraden als das Interpolationsgewicht zwischen  $t_1$  und  $t_3$  geschätzt.

6. Im Fall einer langen Unterbrechung werden die Daten gelöscht, falls der Unterschied zwischen  $t_1$  und  $t_3$  beträchtlich ist.

[0151] Durch dieses Interpolationsverfahren kann die Genauigkeit nicht getriggert Systeme in hohem Maße erhöht werden, und es ist in dem Bestreben, geometrisch genaue Daten zu erhalten, sehr bedeutsam.

[0152] Zusätzlich kann das Betriebssystem, unter dem die Interpolationssoftware läuft, so festgelegt werden, daß der Interpolationssoftware eine hohe Priorität gegeben wird, so daß die Einführung von Verzögerungen infolge der Ausführung anderer Software minimiert wird. Selbst wenn eine andere Softwarefunktion diesen Prozeß unterbricht, wird die Gültigkeit des Prozesses nicht beeinträchtigt, es sei denn, daß der Unterbrechungsprozeß außerordentlich lange dauert. Die Prioritätserteilung ist nicht wesentlich, sie trägt jedoch zu verringerten Zeitfehlern bei, wenn sie im Betriebssystem vorhanden ist.

[0153] Gemäß dieser Ausführungsform ist das Triggern möglich, und es sei mit Bezug auf **Fig. 24** bemerkt, daß das Synchronisationssignal **240** von einer CCD-Kamera **25** durch eine elektronische Schaltungsanordnung **241** entfernt wird und ein Relais **242** verwendet wird, um eine Reihe von Triggerimpulsen **243** für den Armcomputer **2** zu erzeugen. Dies hat den Vorteil, daß sowohl Veränderlichkeiten des Arms als auch der Kamera beseitigt werden und die Genauigkeit des Abtastens für einen gegebenen Arm und eine gegebene Kamera so weit wie möglich erhöht wird.

[0154] Die Bedienerschnittstelleneinrichtung allein ohne Einschluß der Standard-Computereinrichtung in der Art einer Maus und einer Tastatur kann verwendet werden, um das Abtasten und den Computermode-lerzeugung-prozeß und die Funktionalität der Optionen, die ausgelöst werden können, zu steuern. Die Bedienerschnittstelleneinrichtung umfaßt eine Einrichtung zum Navigieren in Menüs, wie Tasten, Fußpedale, Joysticks, Trackballs und die Armpositions-Erfassungseinrichtung.

[0155] Unter Verwendung beliebiger der vorstehenden Einrichtungen kann der Bediener einfach die erforderlichen Operationen und Betriebsparameter auswählen, welche beispielsweise folgende umfassen könnten:

#### Einrichten der Abtastvorrichtung

- Auswählen, welche Positionserfassungsvorrichtung verwendet wird, also des Arms
- Justieren der Sonde in bezug auf die Positionserfassungsvorrichtung und Justieren des Drehtisches
- Festlegen der Abtastung der Punkte, also des Abtastschritts oder der Sehnentoleranz
- Festlegen, wann Daten fortgeworfen werden, weil sich der Arm zu schnell bewegt

## Datenerfassung

- Vorabtasten des Objekts, um herauszufinden, wo es liegt
- kontinuierliches Sammeln von Datenpunkten, während diese Option als Beispiel ausgewählt wird
- Sammeln eines Satzes von Punkten in der Art eines Streifenabschnitts
- Sammeln von Sätzen von Datenpunkten in vorbestimmten Positionsintervallen
- Sammeln von Kontaktbezugspunkten
- Unterbrechen und Neustarten der Datensammlung
- Aufnehmen von Farbbildern

## Prozeß

- Erzeugen eines Polygonal- oder Oberflächenmodells anhand von Zwischendaten
- Erzeugen des Modells in einem ausgewählten Ausgangsformat, beispielsweise 3DS, OBJ
- Abbilden von Farbbildern auf das Modell
- Einbringen überlappender Farbbilder in das Modell
- Schließen von Löchern im Polygongitter
- Zerlegen des Polygongitters
- Glätten des Polygongitters
- Dezimieren des Polygongitters
- Umklappen von Normalen im Polygongitter
- Ändern des Datums und der Orientierung des Koordinatensystems

## Editieren

- Auswählen/Ausschneiden/Kopieren/Löschen von Punkten
- Auswählen/Ausschneiden/Kopieren/Löschen von Polygonen
- Auswählen/Ausschneiden/Kopieren/Löschen von Farbbildern

## Test

- Prüfen der Leistungsfähigkeit des Systems durch Verarbeiten von Daten von der Abtastung einer Kugel
- Prüfen der Leistungsfähigkeit des Systems durch Verarbeiten von Daten von der Abtastung einer flachen Oberfläche

## Anzeige

- Anzeigen von Punkten in der generierten Farbe entsprechend der Tiefe
- Neuzeichnen der Computeranzeige anhand der Position und der Orientierung der Sonde
- Auswählen des Betrachtungsfelds für das Neuzeichnen, also von Zoom bis zu Weitwinkel
- Auswählen eines Betrachtungspunkts aus der

## Liste vorgegebener Betrachtungspunkte

- Anzeigen generierter Daten in einer Farbe
- Anzeigen generierter Daten unter Verwendung der abgetasteten Farbdaten
- Anzeigen des anhand Polygonen oder komplexer Flächen erzeugten Computermodells

## Modelldaten

- Speichern der Punkte/der Zwischendaten/des Modells auf einem Speichermedium in der Art einer Festplatte
- Veröffentlichung der Zwischendaten bzw. des Computermodells als ein Objekt in der Art eines Objekts, das für ein anderes Softwarepaket auf dem Computer oder über ein Netzwerk automatisch verfügbar sein kann
- Laden der Punkte/der Zwischendaten/des Modells von einem Speichermedium in der Art einer Festplatte

## Bereichsbild

- Erzeugen eines neuen linearen Bereichsbilds unter Verwendung der Position und der Orientierung der Sonde, wenn die Option ausgewählt wird
- Erzeugen eines neuen zylindrischen Bereichsbilds unter Verwendung der Position und der Orientierung der Sonde, wenn die Option ausgewählt wird
- Auswählen von einem der definierten Bereichsbilder aus allen definierten Bereichsbildern
- Ändern der Dichte dieses Bereichsbilds
- Löschen der ausgewählten Bereichsbilder
- Löschen aller Bereichsbilder
- Auswählen eines Satzes von Bereichsbildern aus einer Bibliothek von Bereichsbildersätzen, wobei die Bereichsbildersätze der Bibliothek mathematisch organisiert werden könnten, wobei sie beispielsweise genau orthogonal zueinander stehen könnten, wobei sich bei manchen Anwendungen der Abtastdaten Vorteile ergeben können
- Hinzufügen des ausgewählten Bibliothekssatzes zu den gegenwärtig definierten Bereichsbildern
- Erzeugen eines neuen Bibliothekssatzes anhand der existierenden Kombination von Bereichsbildern, wobei auf diese Weise, falls mehrere ähnliche Objekte abzutasten sind, die optimale Bereichsbildkombination für das erste festgelegt werden kann und bei den anderen automatisch wiederverwendet werden kann
- Festlegen des ausgewählten Bibliothekssatzes als der Soll-Bibliothekssatz, wobei auf diese Weise beispielsweise ein Soll-Bibliothekssatz von sechs Bereichsbildern, welche einen Würfel bilden, für viele Objekte verwendet werden kann, so daß der Prozeß der Bereichsbilddefinition nicht erforderlich ist, wodurch der gesamte Abtastprozeß beschleunigt wird

- Löschen aller aktuellen Datenpunkte in allen Bereichsbildern
- Löschen aller Datenpunkte nur in dem ausgewählten Bereichsbild
- Anzeigen von Punkten nur vom ausgewählten Bereichsbild
- Anzeigen von Punkten von allen Bereichsbildern
- Anzeigen von Punkten mit verschiedenen Farben für jedes Bereichsbild
- Aktualisieren aller Bereichsbilder anhand aller anderen Bereichsbilder durch einen Prozeß, bei dem versucht wird, Lücken aufzufüllen oder Einträge in einem Bereichsbild durch Untersuchen der anderen geprüft werden
- Aktualisieren des ausgewählten Bereichsbilds anhand aller anderen Bereichsbilder durch einen Ableitprozeß, bei dem versucht wird, Lücken aufzufüllen oder Einträge in einem Bereichsbild zu prüfen, indem die anderen untersucht werden, wobei dies besonders nützlich ist, wenn ein neues Bereichsbild festgelegt wird, nachdem ein umfangreiches Abtasten ausgeführt worden ist
- Beschränken der Größe eines Bereichsbilds, was häufig erfolgt, wenn ein Bereichsbild speziell festgelegt wird, um einen kleinen Teil der Oberfläche des Objekts zu erfassen, der nicht von den anderen Bereichsbildern abgedeckt ist, wobei dies erfolgen kann, um in einem Computer mit begrenztem Speicher Speicher zu sparen, wobei hierdurch auch der gesamte Prozeß beschleunigt werden kann
- Auswählen und Initialisieren eines Algorithmus zum automatischen Konstruieren eines Modells von Polygonen oder komplexen Flächen anhand eines Bereichsbilds
- Auswählen und Initialisieren eines Algorithmus zum automatischen Konstruieren eines Modells von Polygonen oder komplexen Flächen anhand aller Bereichsbilder
- Festlegen der Parameter in der Art des Genauigkeitsgrads, wodurch ein Algorithmus ein Modell von Polygonen oder komplexen Flächen konstruiert
- Auswählen eines Integrationsalgorithmus, der die Polygonmodelle kombiniert, die anhand der Bereichsbilder erzeugt worden sind
- Auswählen einer vordefinierten Folge von Algorithmen, wodurch automatisch ein vollständiges Modell von Polygonen oder komplexen Flächen anhand eines Satzes von Bereichsbildern erzeugt wird

[0156] Komplexe Oberflächen können anhand markierter Oberflächen-Fleckengrenzen erzeugt werden. Mit Bezug auf **Fig. 25** sei bemerkt, daß das Objekt **130** mit einer gleichmäßigen Farbe bemalt wird (falls erforderlich), bevor die Fleckengrenzen **131**, beispielsweise unter Verwendung eines schwarzen Markerstifts auf einem weißen Objekt, von Hand mit einer anderen Farbe markiert werden. Es ist nicht

wichtig, diese Grenzen genau zu markieren, weil sie gewöhnlich von Merkmalen, wie Rändern oder schnellen Änderungen der Oberflächennormalen, entfernt liegen. Das Objekt wird dann unter Verwendung von einem der offenbarten Verfahren abgetastet. Die Farbinformationen werden dann verwendet, um die Fleckengrenzen automatisch durch einen Algorithmus zu erzeugen, der die Punkte **132**, die auf den Fleckengrenzen liegen, durch ein Farbfilter abtrennt und dann Flecken-Grenzlinien in der Art von Splines **133** an diese Punkte anpaßt. Die Ränder können auch unter Verwendung eines getrennten Algorithmus erfaßt werden. Die Fleckengrenzen, die anhand der Abtastung automatisch erzeugt worden sind, können dann verwendet werden, um das komplexe Oberflächenmodell zu erzeugen. Der Hauptvorteil dieses Verfahrens besteht darin, daß es vor der automatischen Erzeugung des komplexen Oberflächenmodells leichter ist, Fleckengrenzen auf dem Objekt als auf dem Computermodell zu markieren.

[0157] Mit Bezug auf **Fig. 26a** wird eine Implementation **333** offenbart, bei der der mehrgelenkige Arm **1** am Ende des horizontalen Arms der horizontalen Armmeßmaschine **330** angebracht ist, um ein großes Objekt **331** abzutasten. Die horizontale Armmeßmaschine **330** weist einen Maschinensteuerekasten **332** auf, der die Position der Maschine an den Computer **4** ausgibt. Die Armsteuerung **2** und die Sonde **3** sind auch an den Computer **4** angeschlossen. Diese Implementation macht das Abtasten großer Objekte in der Hinsicht genauer, daß entweder ein großer Arm oder eine sprungweise Bewegung weniger genau wäre als ein horizontaler Arm und in der Hinsicht einfacher wäre, daß jedesmal dann, wenn der horizontale Arm bewegt wird, die Software dies automatisch berücksichtigt, statt daß eine Neuregistrierung unter Verwendung eines Sprungbewegungsverfahrens erforderlich wäre. Bei Industriefirmen, die große Objekte haben, wie es bei Automobilherstellern der Fall ist, sind gewöhnlich horizontale Armmaschinen vorhanden, so daß die Implementation hierdurch besonders attraktiv gemacht wird.

[0158] Eine Ausführungsform ist eine allgemeine Vorrichtung zur Herstellung von 3D-Modellen, und sie hat einen breiten Bereich von Anwendungen. Die Anwendungsindustrien für diese Ausführungsform umfassen Designentwickler, die Tonobjekte schnell und genau zu Computermodellen verwandeln müssen, Spieleentwickler und Trickfilmzeichner, die neue Zeichen in 3D-Datensätze für eine Animation umwandeln müssen, Schuhhersteller, die kundenspezifische Schuhe herstellen müssen, sowie Automobilhersteller, die die tatsächlichen Kabel- und Rohrverläufe in begrenzten Räumen modellieren müssen, und medizinische Anwendungen umfassen die Strahlentherapie und die Wundbehandlung. Insgesamt wurden etwa 200 Anwendungen identifiziert.

[0159] Mit Bezug auf **Fig. 27** sei bemerkt, daß die Abtastvorrichtung **100** als ein Beispiel für ihre Anwendungen zum Abtasten eines menschlichen Fußes

**141** verwendet werden kann, wobei auch offenbart ist, daß das volle Körpergewicht auf Oberflächen unterschiedlicher Elastizität darauf lastet. Zuerst wird die Außenseite des Fußes **141** unter Verwendung der vorstehend offenbarten Verfahren und Vorrichtungen abgetastet, wobei der erforderliche Betrag des Körpergewichts ausgeübt wird. Der Fuß **141** wird dann entfernt, und es wird eine zweite Abtastung der Oberfläche **142** ausgeführt, auf die der Fuß **141** gedrückt wurde. Die erste Abtastung ist eine Positiv-Abtastung. Die zweite Abtastung ist eine Negativ-Abtastung. Die Oberflächennormalen der zweiten Abtastung werden dann durch einen einfachen Algorithmus umgekehrt, und die beiden Abtastungen werden kombiniert, um die positive Form des Fußes zu erhalten. Es ist wichtig, daß, falls ein verformbares Material verwendet wird, dieses nicht zurückfedert. Ein solches Material kann Sand, Ton oder Gips sein. Für unterschiedliche Anwendungen können Materialien unterschiedlicher Elastizität geeignet sein. Dieses Verfahren ist auch geeignet, wenn der Fuß auf die untere Hälfte eines Schuhs gedrückt wird, wobei die Seiten abgeschnitten sind.

[0160] Automobilhersteller haben einen Bedarf, den tatsächlichen Verlauf von Rohren und Kabeln in begrenzten Bereichen in der Art eines Motorraums zu identifizieren. Automobilhersteller versuchen, alle Aspekte eines Autos in 3D-CAD zu modellieren. Sie benötigen irgendeine Methode zum Abtasten von Rohren und Kabeln im Bezugssystem des Autos, so daß 3D-Modelle einer hohen Ebene der Rohre und Kabel ausgegeben werden, welche in das CAD-System eingegeben werden können, um den tatsächlichen Verlauf und mögliche Störungen zu identifizieren. Falls beim Abtasten von Rohren und Kabeln beispielsweise in begrenzten Räumen ein Problem auftritt, daß schwarze oder glänzende Gegenstände nicht abtastbar sind, können diese zuerst mit einem weißen Pulver bestreut werden, das sich nach dem Abtasten leicht entfernen läßt.

[0161] Mit Bezug auf **Fig. 28** sei bemerkt, daß es häufig besser ist, ein Kabel oder ein Rohr **341** als eine Anzahl von Streifenabschnitten **342** bis **349** statt als eine große Anzahl dicht beabstandeter Streifen abzutasten. Ein Streifensensor kann in einem ersten Modus aktiviert werden, um einen einzigen Streifenabschnitt durch den eine Taste oder ein Fußpedal aktivierenden Bediener herauszugreifen. Auf diese Weise kann der Bediener eine kleine Anzahl von Abschnitten herausgreifen, um den Weg des Rohrs zu beschreiben, wobei er sein Expertenwissen verwendet, um zu entscheiden, wann Abschnitte herausgegriffen werden sollen. Wenn ein Rohr beispielsweise mit einem anderen Rohr verbunden ist, kann es angemessen sein, viel mehr Streifenabschnitte **344** bis **349** einzufangen. Wenn es weiterhin ein Merkmal gibt, wie eine Befestigung an einem Rohr, kann es angemessen sein, sehr dichte Streifen zu erfassen. Ein zweiter Modus würde darin bestehen, Streifenabschnitte so schnell zu erfassen, wie der Sensor sie

erfassen kann, und sie als eine Oberfläche auf der Anzeige darzustellen. Ein dritter Modus wäre ein Modus, in dem der Bediener den Abstand zwischen den Abschnitten von beispielsweise 5 mm spezifiziert und das System einen Streifenabschnitt automatisch beispielsweise alle 5 mm, um die sich der Streifen im dreidimensionalen Raum bewegt, aufnimmt. Ein Verfahren zum Bestimmen dieses Abstands besteht darin, den Punkt beim durchschnittlichen Abstand in der Mitte des Streifens, also am Mittelpunkt des Meßbereichs auszuwählen, und wenn sich dieser Punkt 5 mm bewegt hat, automatisch einen anderen Streifenabschnitt zu erfassen. Wenn der Bediener Rohre und Kabel abtastet, sollte das Bedienersteuersystem das einfache Umschalten zwischen den drei Modi unterstützen.

[0162] Die Zwischendatenstruktur, in der die Streifenabschnitte zusammengestellt werden, könnte die Standard-Streifenabschnittsstruktur **303** sein, sie könnte jedoch Änderungen des Modus und der Orientierung der Sonde für jeden Abschnitt aufweisen. Beim Abtasten von Rohren und Kabeln werden auch Plattenabschnitte **342a**, **342d**, entlang derer die Rohre und Kabel verlaufen, erfaßt. Wenn zwischen dem Rohr und der Platte kein Kontakt auftritt, tritt ein Sprung oder eine Unterbrechung des Streifenabschnitts auf. Dies kann in der Datenstruktur mit Sprung-Hinweiszeichen **305** und Unterbrechungs-Hinweiszeichen **304** angezeigt werden.

[0163] Um für einen Automobilhersteller nützlich zu sein, sollte anhand dieser Daten ein Modell einer hohen Ebene erzeugt und ausgegeben werden. Ein Polygonbildungs- oder Oberflächenbildungsverfahren verbindet die Abschnitte miteinander und kann das Zusammenfügen von Rohren, Platten usw. behandeln. Das Ergebnis sind Modelle **350** bis **352** einer hohen Ebene. Falls mehr Informationen über das Rohr oder das Kabel, wie ihr Querschnitt, falls er konstant ist, oder ihre Form, selbst wenn sich die Abmessungen der Form ändern, beispielsweise kreisförmig, jedoch mit veränderlichem Durchmesser, bekannt sind, kann das Modell **351** automatisch zu **353** erweitert werden. Alternativ können zwei abgetastete Seiten desselben Rohrs automatisch zusammengefügt werden. Hierdurch wird dem Automobilhersteller das Modell hoher Ebene zur Verfügung gestellt, das er benötigt.

[0164] Wie Fachleute verstehen werden, können verschiedene Modifikationen vorgenommen werden. Beispielsweise braucht die Farbkamera nicht aufgenommen zu werden. Es könnte eine einzige Kamera sowohl zur Farb- als auch zur Positionserfassung verwendet werden. Das Filter in der Sonde könnte ein schmales Bandpaßfilter oder ein hohes Bandpaßfilter für Rot sein, je nach dem, was erforderlich ist. Das System kann an viele Modellerzeugungstypen und nicht nur jene, die hier erörtert sind, angepaßt werden. Die von der Sonde gesammelten Daten könnten auch für andere Anwendungen verwendet werden, und sie könnten zur Verbreitung an andere

Orte, beispielsweise durch E-mail, gespeichert werden. Die Sonde kann eine Streifen-sonde oder eine Flächen-sonde sein. Die Anzeige kann, abhängig von den Anwendungsanforderungen, an einem anderen Ort angebracht werden.

### Patentansprüche

1. Abtastvorrichtung (100) zum Abtasten eines Objekts unter Erzeugung von Daten, die Punkte im dreidimensionalen Raum festlegen, die Punkten auf der Oberfläche des Objekts entsprechen, aufweisend:

eine Abtasteinrichtung (3), die zur Bewegung durch einen Bediener auf einem mehrgelenkigen Arm (1) befestigt ist, um das Objekt abzutasten und Daten von mehreren Punkten auf der Oberfläche des Objekts zu erfassen, und die aufweist:

- einen Laser (22) zum Aussenden von Laserlicht auf die Oberfläche des Objekts, und
- eine Kamera (25) zum Erfassen von von der Oberfläche des Objekts reflektiertem Laserlicht durch Aufzeichnen von Bildern zu Zeitpunkten, die von einem Synchronisationssignal (240) festgelegt sind, eine Positions-berechnungseinrichtung (2) zur Berechnung der Position des mehrgelenkigen Arms und zur Ausgabe von die Position festlegenden Positionsdaten in Reaktion auf einen Triggerimpuls (243), eine Einrichtung (241, 242), um das Synchronisationssignal (240) für die Kamera (25) zu empfangen, das deren Bildaufzeichnungszeitpunkte festlegt, und um daraufhin Triggerimpulse (243) für die Positions-berechnungseinrichtung zu erzeugen und auszugeben, um diese zu veranlassen, für jedes von der Kamera aufgezeichnete Bild Positionsdaten auszugeben, und
- eine Modelliereinrichtung (4) zum Empfang von von der Kamera (25) ausgegebenen Bildern und zugeordneten von der Positions-berechnungseinrichtung ausgegebenen Positionsdaten und zur Verarbeitung der Daten unter Erzeugung von Daten, die Punkte im dreidimensionalen Raum festlegen, die Punkten auf der Oberfläche des Objekts entsprechen.

2. Vorrichtung zur Verwendung in einer Abtastvorrichtung nach Anspruch 1, aufweisend:

eine Abtasteinrichtung (3) zur Befestigung auf einem mehrgelenkigen Arm (1) zur Bewegung durch einen Bediener, um ein Objekt abzutasten und Daten von mehreren Punkten auf der Oberfläche des Objekts zu erfassen, aufweisend:

- einen Laser (22) zum Aussenden von Laserlicht auf die Oberfläche des Objekts, und
- eine Kamera (25) zur Erfassung von von der Oberfläche des Objekts reflektiertem Laserlicht durch Aufzeichnen von Bildern zu Zeitpunkten, die von einem Synchronisationssignal (240) festgelegt sind, eine Einrichtung (241, 242), um das Synchronisationssignal (240) für die Kamera (25) zu empfangen, das deren Bildaufzeichnungszeitpunkte festlegt, und

um daraufhin Triggerimpulse (243) für die Positions-berechnungseinrichtung eines mehrgelenkigen Arms zu erzeugen und auszugeben, um diese zu veranlassen, für jedes von der Kamera aufgezeichnete Bild Positionsdaten auszugeben, und

eine Modelliereinrichtung (4) zum Empfang von von der Kamera (25) ausgegebenen Bildern und zugeordneten von der Positions-berechnungseinrichtung ausgegebenen Positionsdaten und zur Verarbeitung der Daten unter Erzeugung von Daten, die Punkte im dreidimensionalen Raum festlegen, die Punkten auf der Oberfläche des Objekts entsprechen.

3. Abtastvorrichtung (100) zum Abtasten eines Objekts unter Erzeugung von Daten, die Punkte im dreidimensionalen Raum festlegen, die Punkten auf der Oberfläche des Objekts entsprechen, aufweisend:

eine Abtasteinrichtung (3), die zur Bewegung durch einen Bediener auf einem mehrgelenkigen Arm (1) befestigt ist, um das Objekt abzutasten und Daten von Punkten auf der Oberfläche des Objekts zu erfassen, und die aufweist:

- einen Laser (22) zum Aussenden von Laserlicht auf die Oberfläche des Objekts,
- eine Kamera (25) zur Erfassung von von der Oberfläche des Objekts reflektiertem Laserlicht, und
- eine Spitzensonde (51) zum Berühren der Oberfläche des Objekts an einzelnen Punkten,

eine Positions-berechnungseinrichtung (2) zur Berechnung der Position des mehrgelenkigen Arms und zur Ausgabe von Positionsdaten, die die Position festlegen,

eine Steuereinrichtung zum Umschalten zwischen einem ersten Datenerfassungsmodus der Vorrichtung, in dem diese Daten von mehreren Punkten auf der Oberfläche des Objekts durch Bestrahlung des Objekts mit Laserlicht von dem Laser (22) und durch Erfassen von von der Oberfläche des Objekts reflektiertem Laserlicht mit der Kamera (25) erfassen kann, während die Spitzensonde auf dem mehrgelenkigen Arm (1) verbleibt, und einem zweiten Datenerfassungsmodus, in dem die Vorrichtung Daten von einzelnen Punkten auf der Oberfläche des Objekts erfassen kann, die von der Spitzensonde (51) berührt werden, während die Kamera und der Laser auf dem mehrgelenkigen Arm (1) verbleiben, und

eine Modelliereinrichtung (4) zum Empfang von von der Kamera (25) ausgegebenen Bildern und von der Positions-berechnungseinrichtung ausgegebenen Positionsdaten und zum Verarbeiten der Daten unter Erzeugung von Daten, die Punkte im dreidimensionalen Raum festlegen, die Punkten auf der Oberfläche des Objekts entsprechen.

4. Vorrichtung zur Verwendung in einer Abtastvorrichtung nach Anspruch 3, aufweisend:

eine Abtasteinrichtung (3) zur Befestigung auf einem mehrgelenkigen Arm (1) zur Bewegung durch einen Bediener, um ein Objekt abzutasten und Daten von

Punkten auf der Oberfläche des Objekts zu erfassen, aufweisend:

- einen Laser (22) zum Aussenden von Laserlicht auf die Oberfläche des Objekts,
- eine Kamera (25) zur Erfassung von von der Oberfläche des Objekts reflektiertem Laserlicht, und
- eine Spitzensonde (51) zum Berühren der Oberfläche des Objekts an einzelnen Punkten,

eine Steuereinrichtung zum Umschalten zwischen einem ersten Datenerfassungsmodus der Vorrichtung, in dem diese Daten von mehreren Punkten auf der Oberfläche des Objekts durch Bestrahlung des Objekts mit Laserlicht von dem Laser (22) und Erfassung von von der Oberfläche des Objekts reflektiertem Laserlicht mit der Kamera (25) erfassen kann, während die Spitzensonde auf dem mehrgelenkigen Arm (1) verbleibt, und einem zweiten Datenerfassungsmodus, in dem die Vorrichtung Daten von einzelnen Punkten auf der Oberfläche des Objekts erfassen kann, die von der Spitzensonde (51) berührt werden, während der Laser und die Kamera auf dem mehrgelenkigen Arm (1) verbleiben, und eine Modelliereinrichtung (4) zum Empfang von von der Kamera (25) ausgegebenen Bildern und zugeordneten von der Positionsberechnungseinrichtung ausgegebenen Positionsdaten des mehrgelenkigen Arms und zur Verarbeitung der Daten unter Erzeugung von Daten, die Punkte im dreidimensionalen Raum festlegen, die Punkten auf der Oberfläche des Objekts entsprechen.

der Oberfläche des Objekts entsprechen, wobei das Verfahren folgende Schritte umfaßt: Empfangen des Synchronisationssignals (240) für die Kamera (25), das deren Bildaufzeichnungszeitpunkte festlegt, und daraufhin Erzeugen und Ausgeben von Triggerimpulsen (243) an die Positionsberechnungseinrichtung, um diese zu veranlassen, für jedes von der Kamera aufgezeichnete Bild Positionsdaten auszugeben.

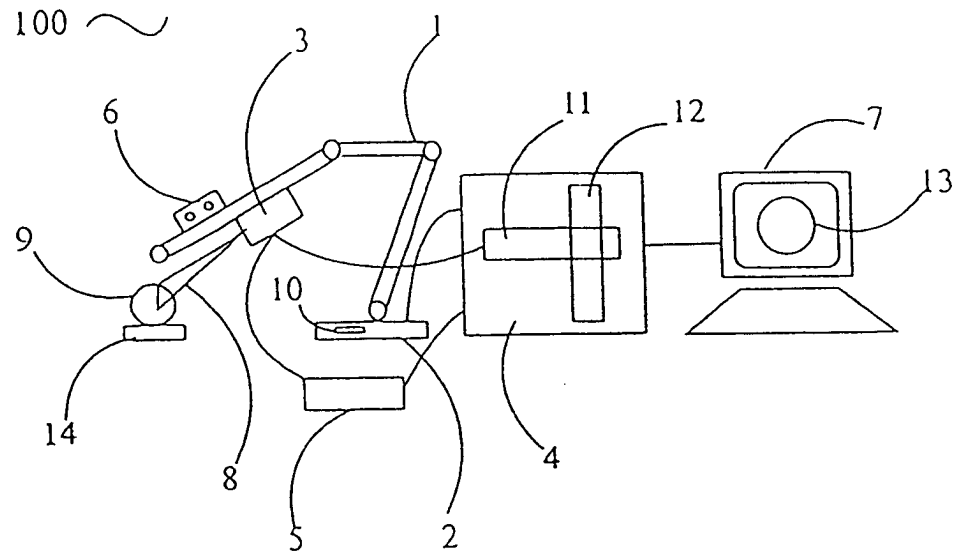
Es folgen 23 Blatt Zeichnungen

5. Verfahren zur Synchronisation der Aufzeichnung von Bildern durch eine Kamera und der Erzeugung von Daten, die die Position der Kamera festlegen, in einem System zum Abtasten eines Objekts unter Erzeugung von Daten, die Punkte im dreidimensionalen Raum festlegen, die Punkten auf der Oberfläche des Objekts entsprechen, das aufweist: eine Abtasteinrichtung (3), die zur Bewegung durch einen Bediener auf einem mehrgelenkigen Arm (1) befestigt ist, um das Objekt abzutasten und Daten von mehreren Punkten auf der Oberfläche des Objekts zu erfassen, und die aufweist:

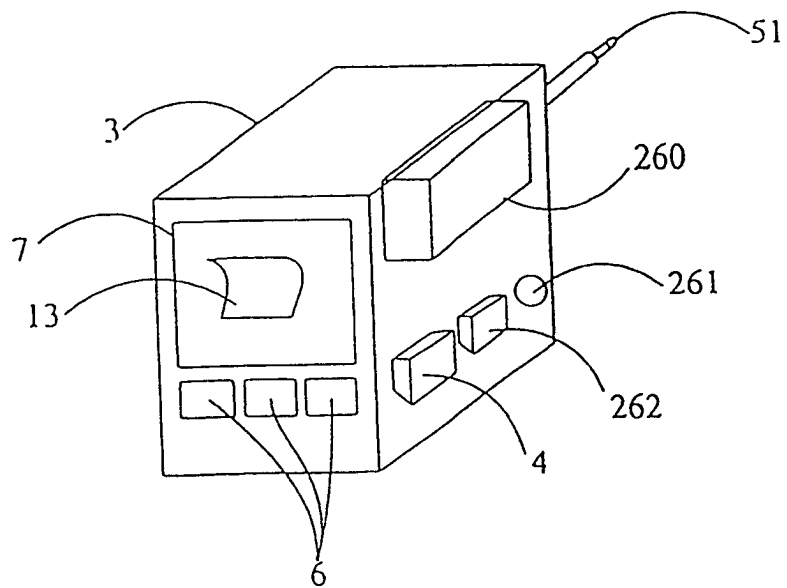
- einen Laser (22) zum Aussenden von Laserlicht auf die Oberfläche des Objekts, und
- eine Kamera (25) zur Erfassung von von der Oberfläche des Objekts reflektiertem Laserlicht durch Aufzeichnen von Bildern zu Zeitpunkten, die von einem Synchronisationssignal (240) festgelegt werden,

eine Positionsberechnungseinrichtung (2) zur Berechnung der Position des mehrgelenkigen Arms und zur Ausgabe von Positionsdaten, die die Position festlegen, in Reaktion auf einen Triggerimpuls (243), und eine Modelliereinrichtung (4) zum Empfang von von der Kamera (25) ausgegebenen Bildern und zugeordneten von der Positionsberechnungseinrichtung ausgegebenen Positionsdaten und zur Verarbeitung der Daten unter Erzeugung von Daten, die Punkte im dreidimensionalen Raum festlegen, die Punkten auf

Figur 1

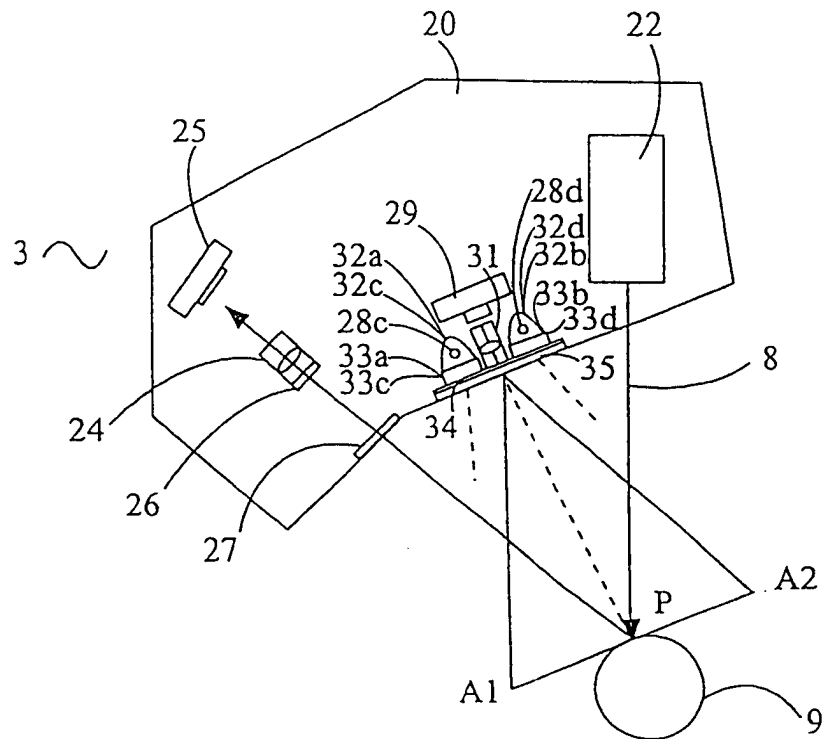


Figur 2

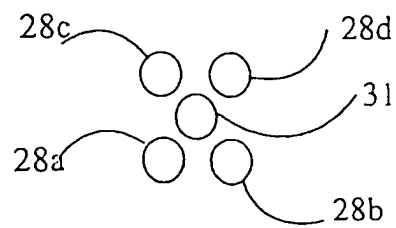




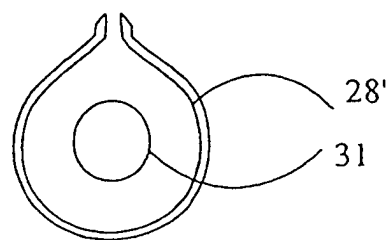
Figur 3(a)



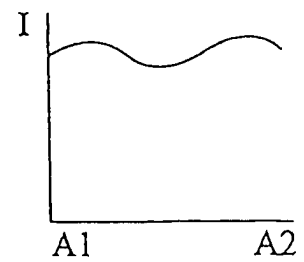
Figur 3(b)



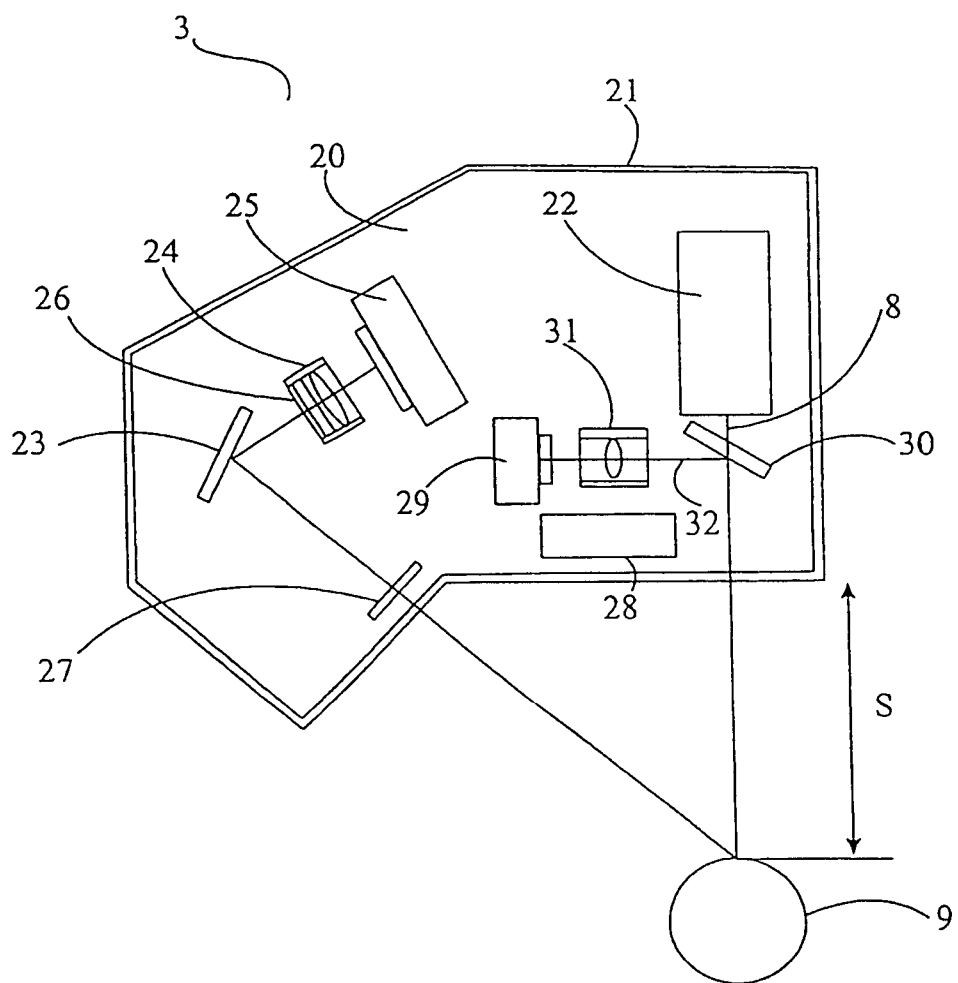
Figur 3(c)



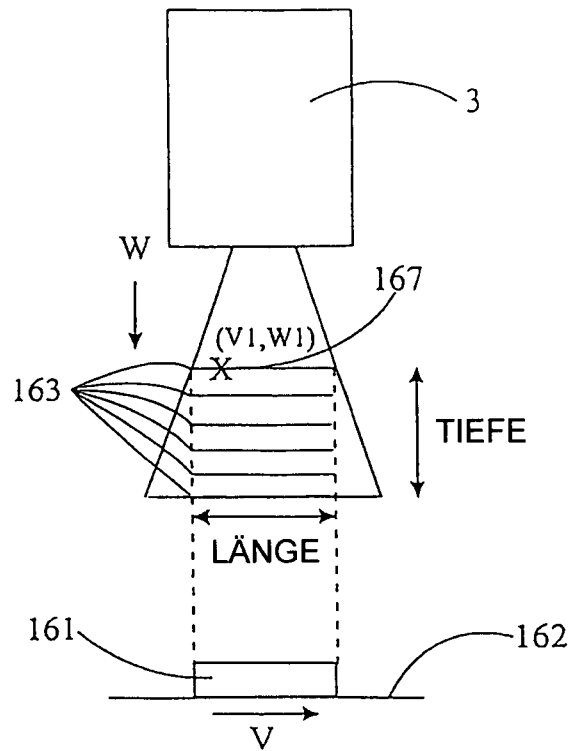
Figur 3(d)



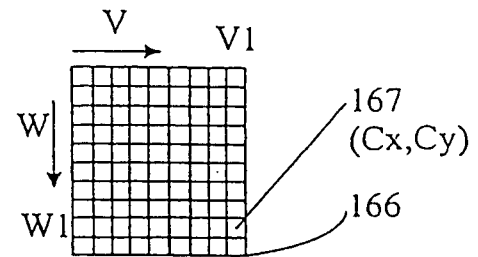
Figur 4



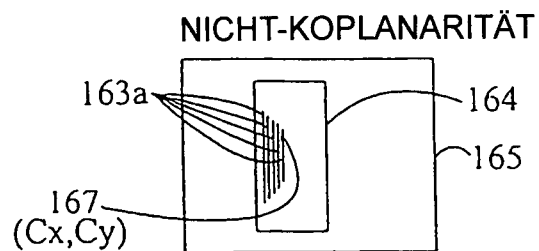
Figur 5(a)



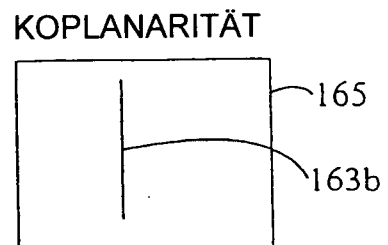
Figur 5(d)



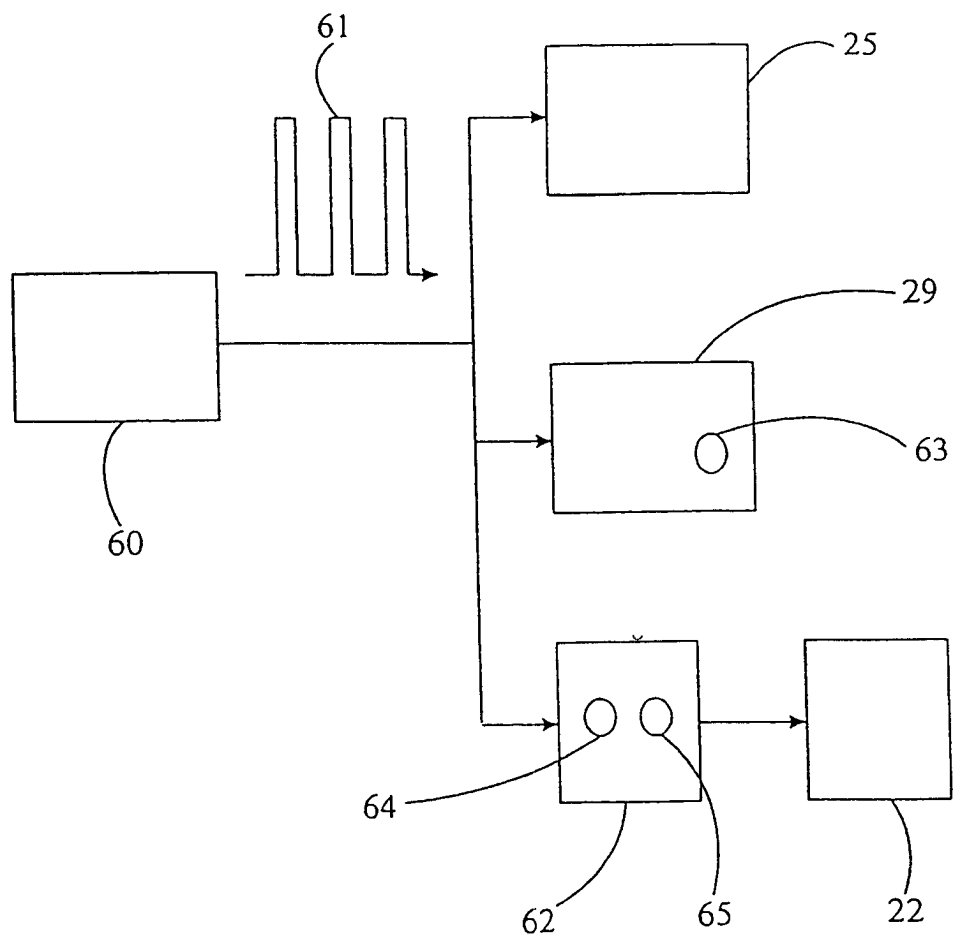
Figur 5(b)



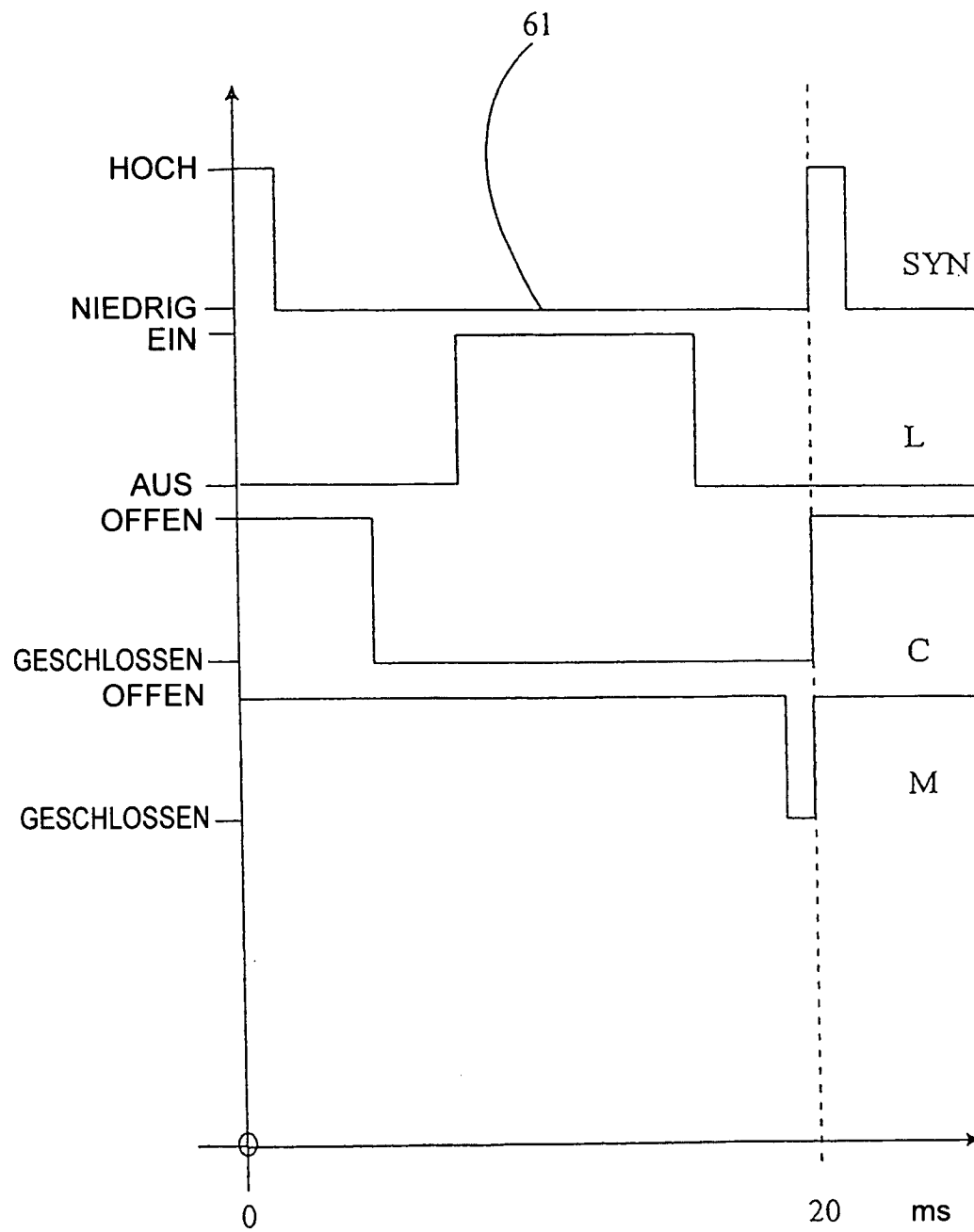
Figur 5(c)



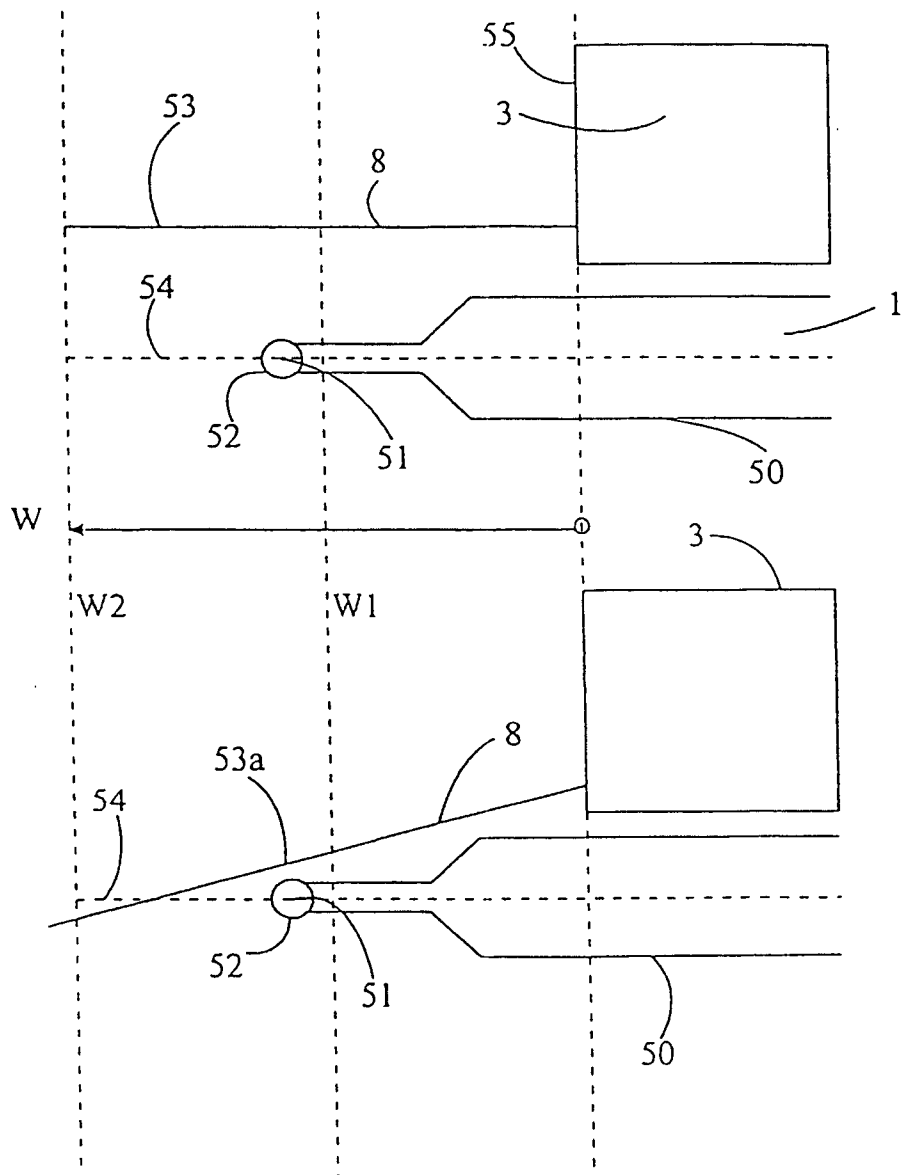
Figur 6



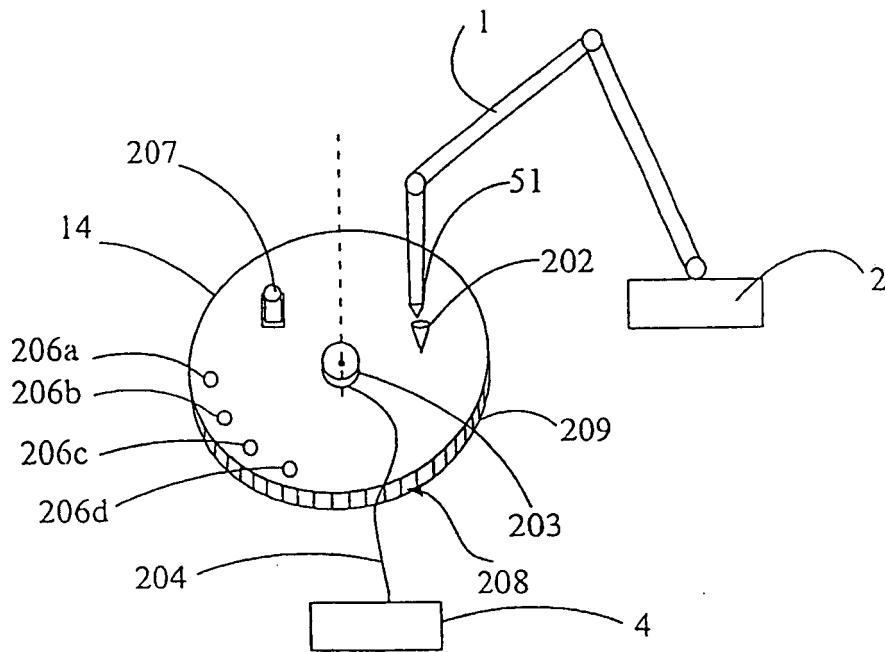
Figur 7



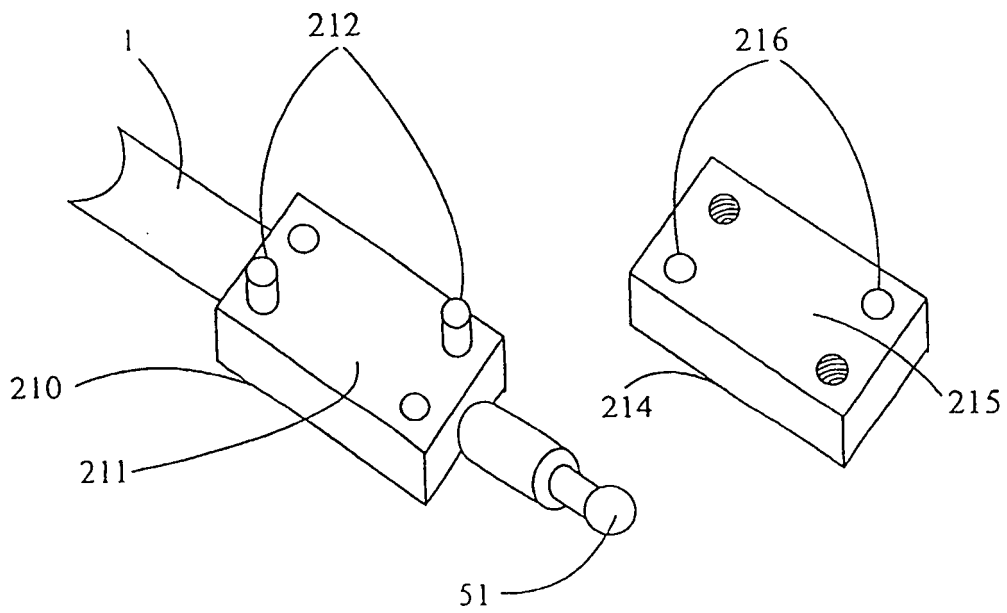
Figur 8



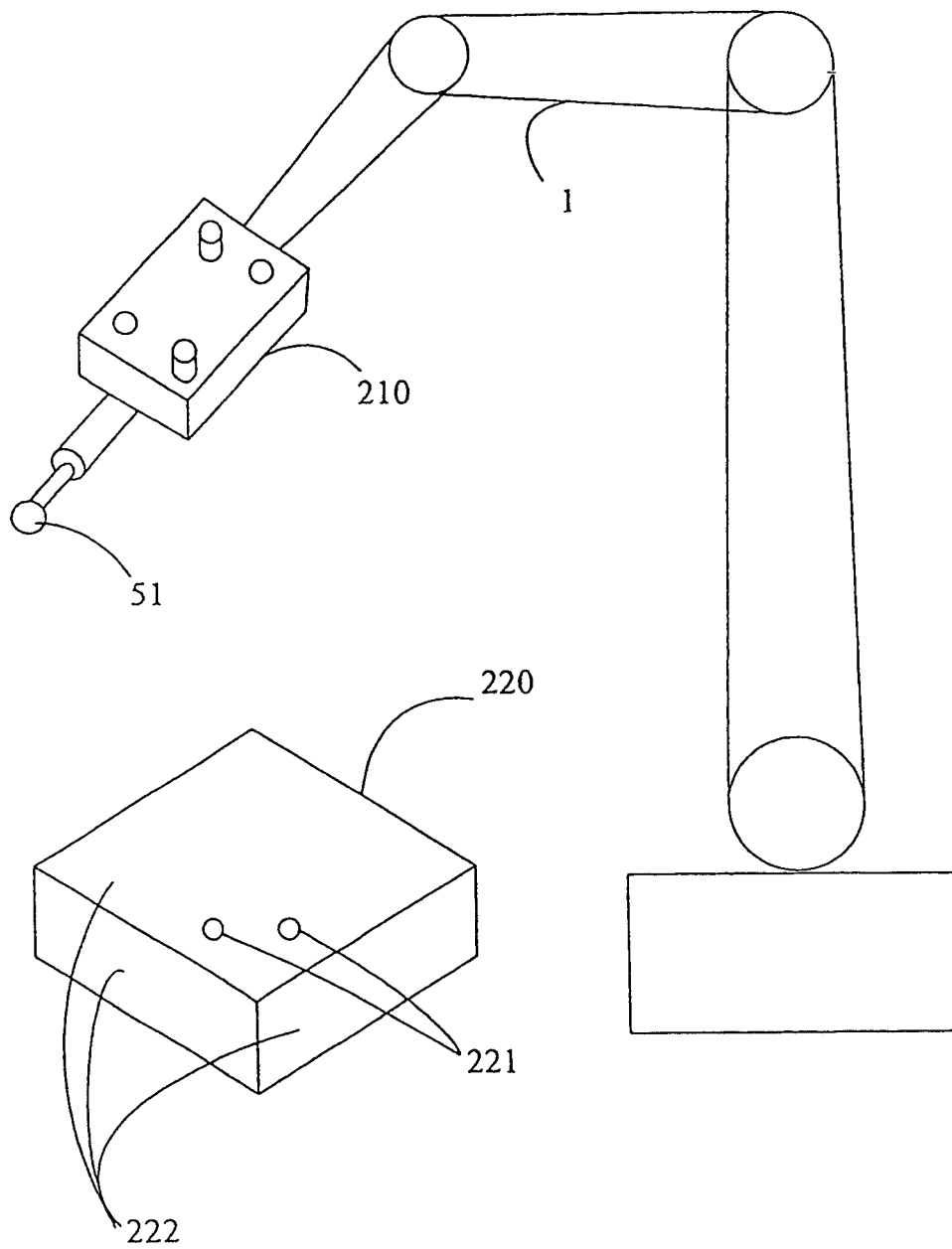
Figur 9



Figur 10

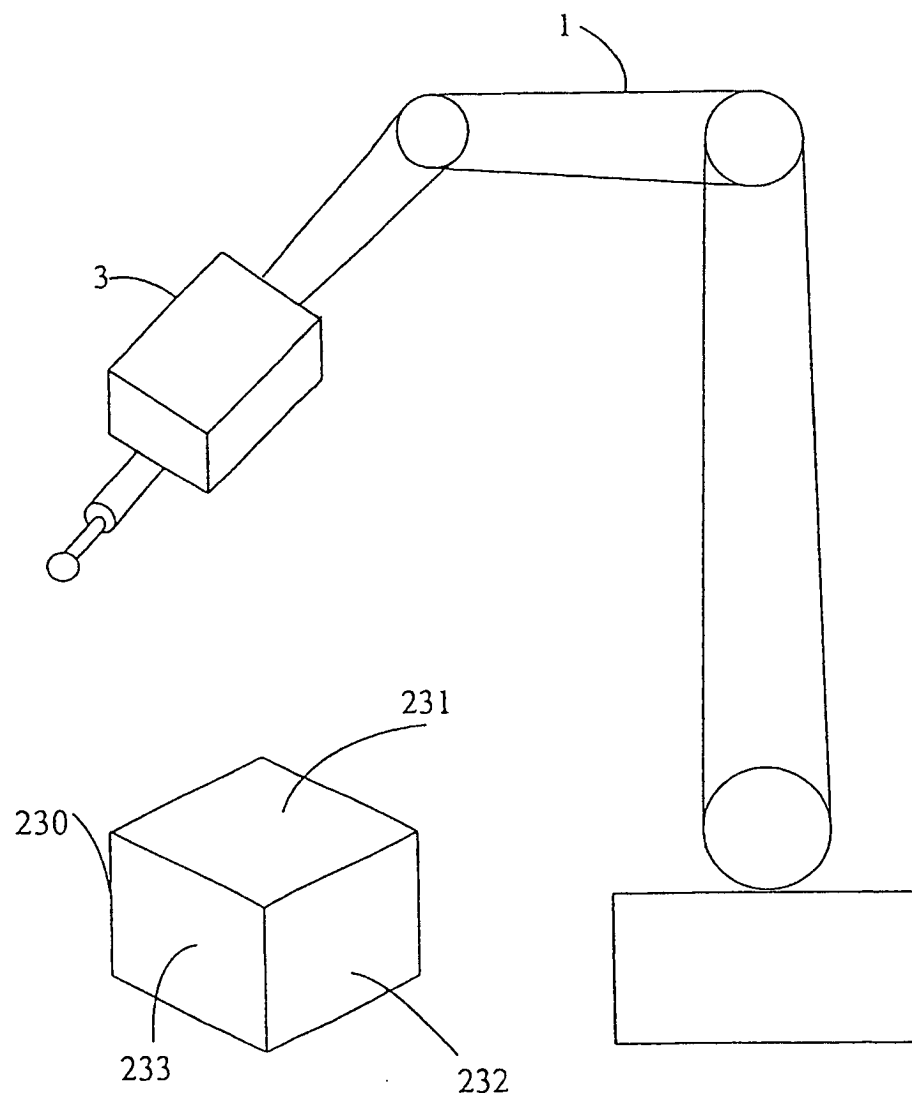


Figur 11

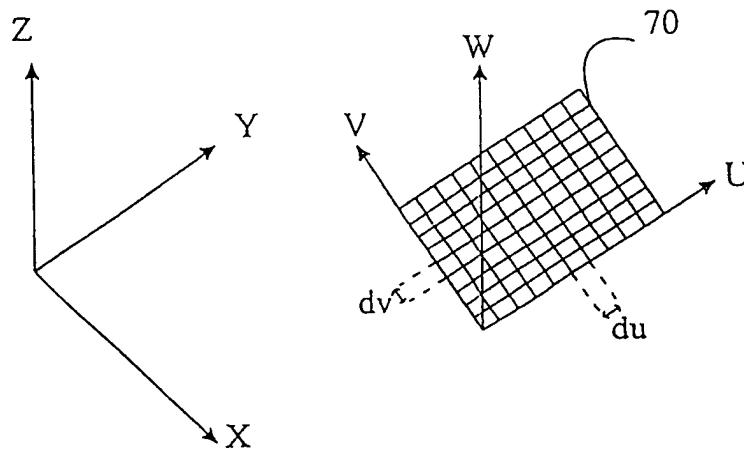




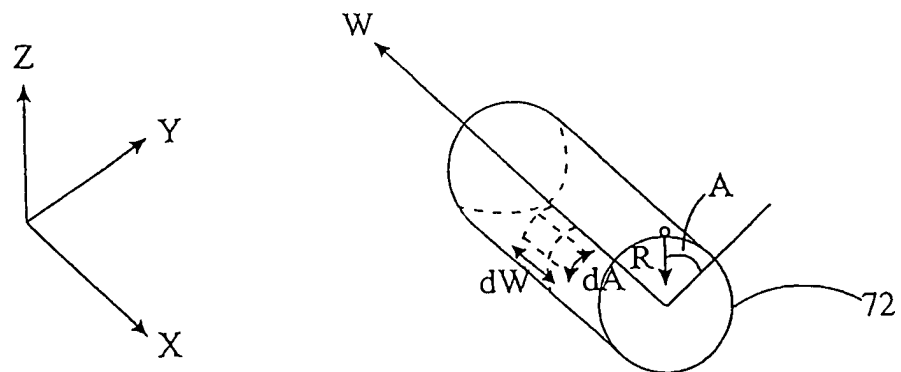
Figur 12



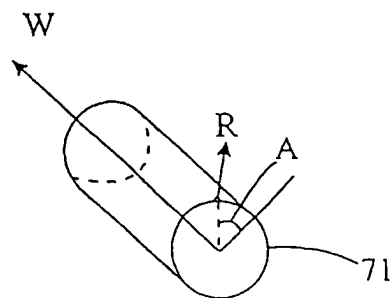
Figur 13



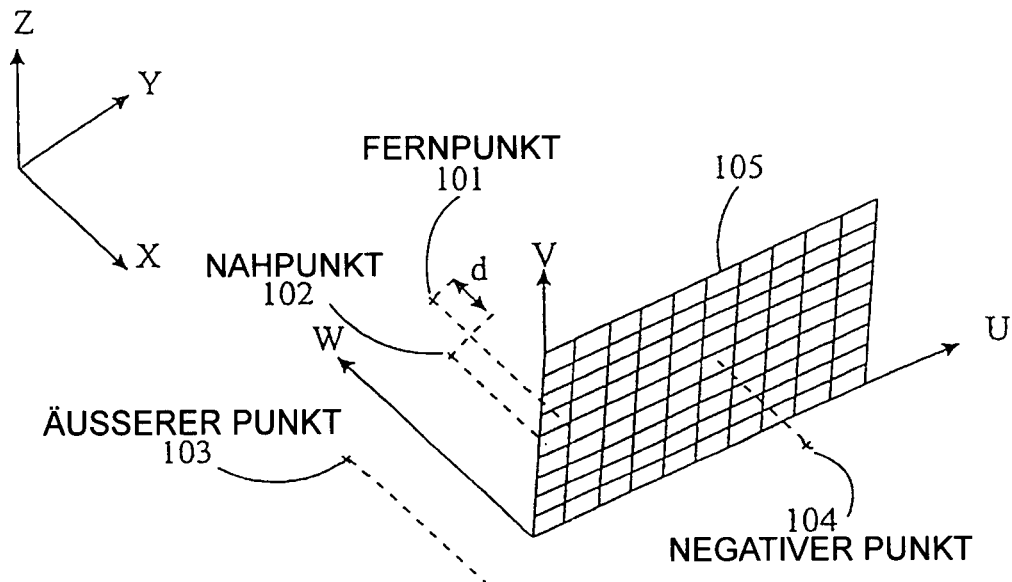
Figur 14(a)



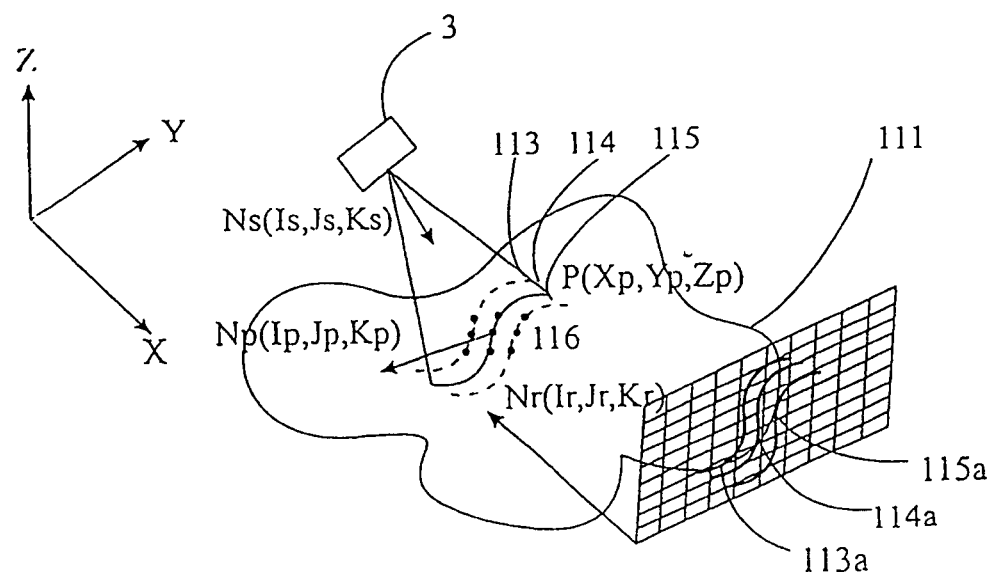
Figur 14(b)



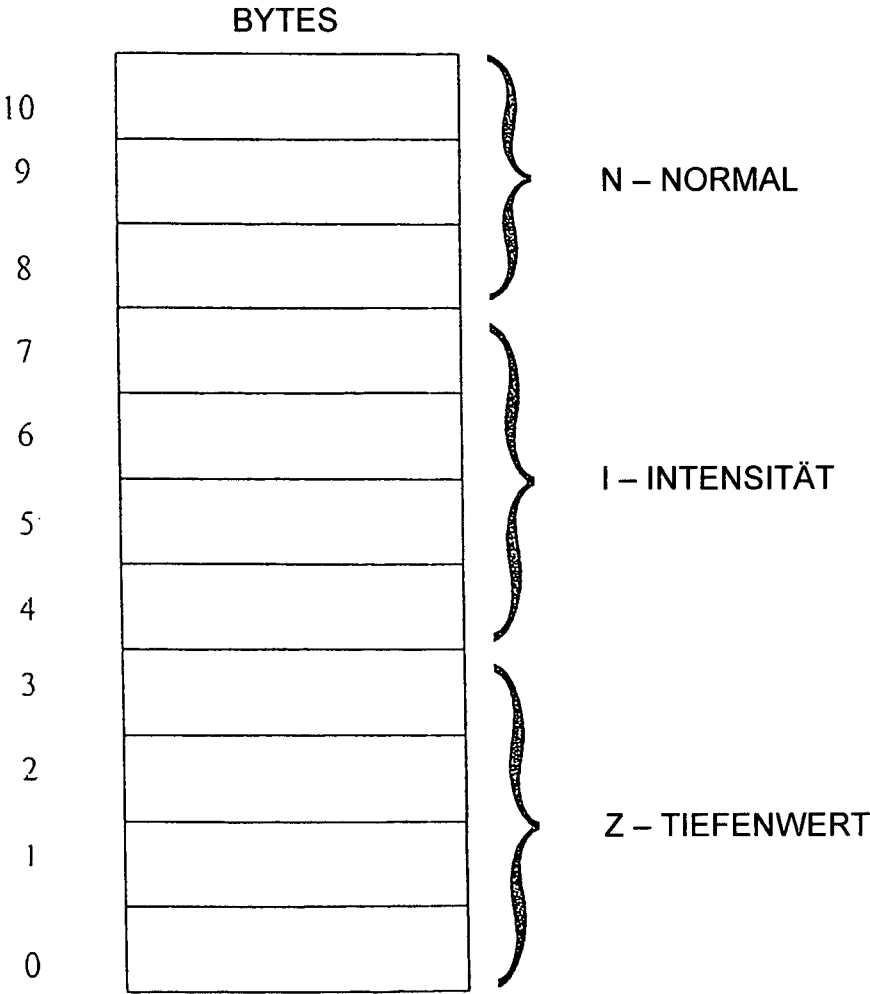
Figur 15



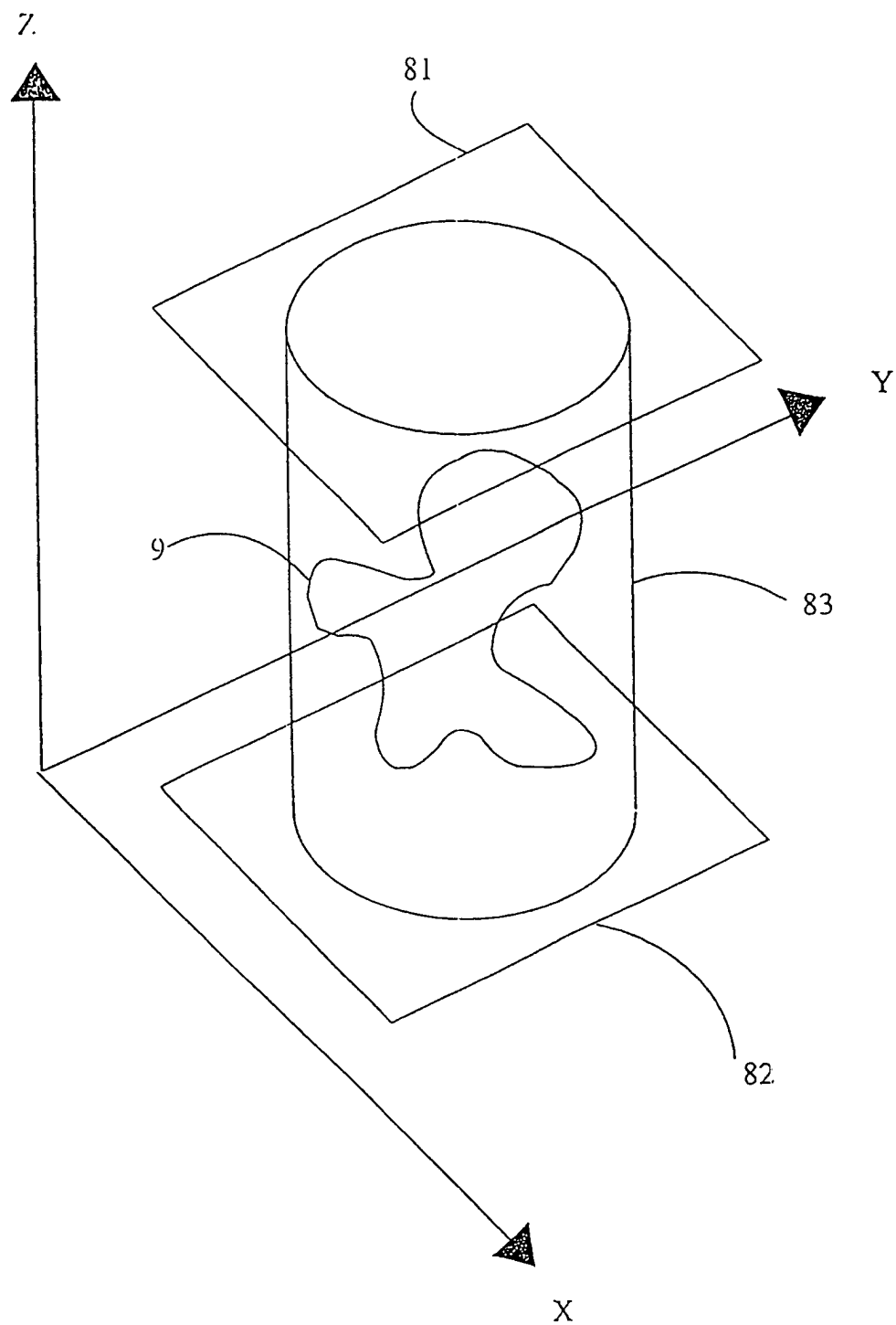
Figur 16



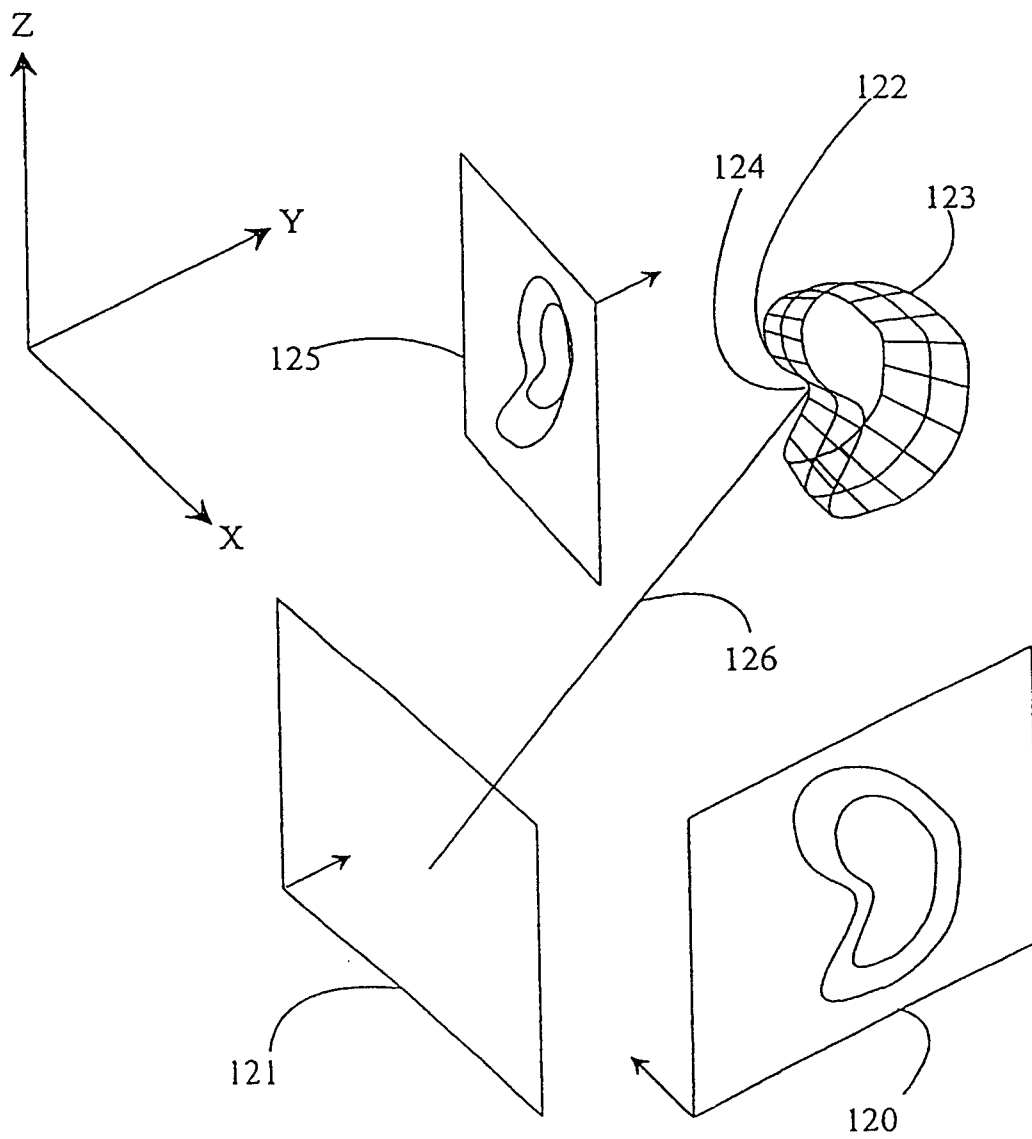
Figur 17

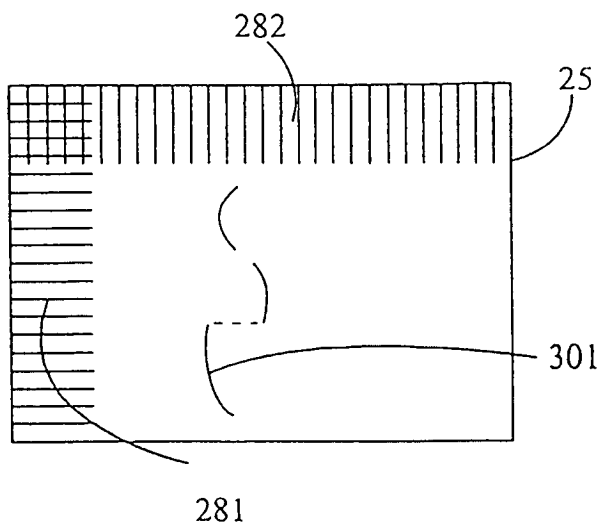


Figur 18



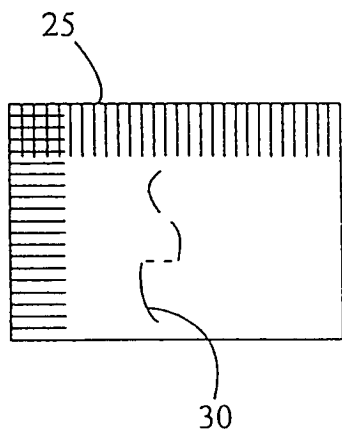
Figur 19



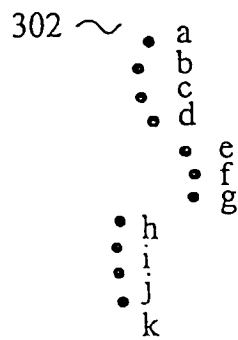


Figur 20(a)

Figur 20(b)



Figur 20(c)



Figur 20(d)

302a  
302b  
302c  
302d  
304g  
302h  
302i  
302j  
302j  
305  
302k  
302l

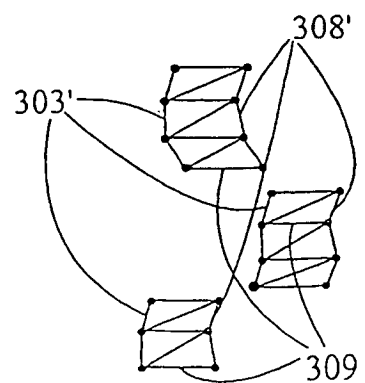
Figur 20(e)



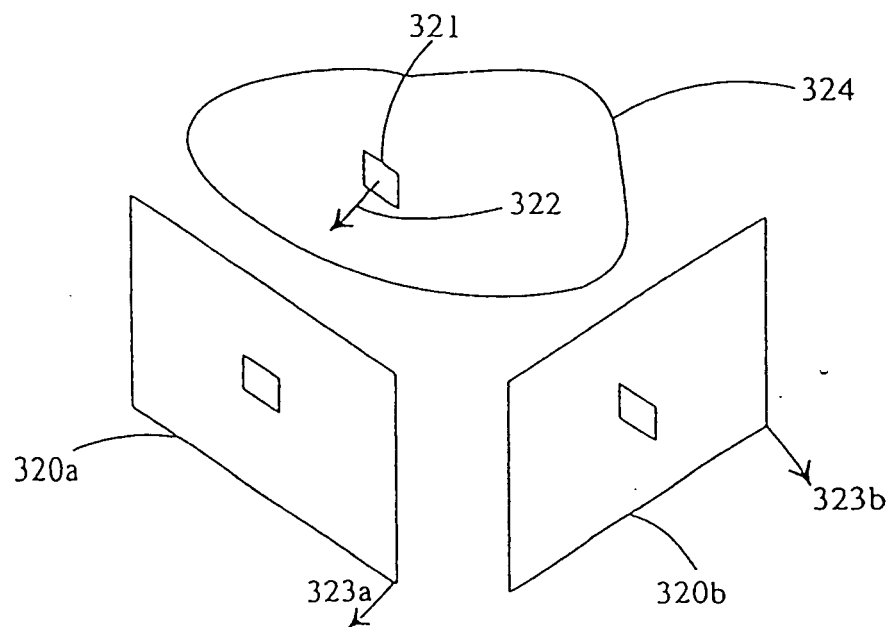
Figur 20(f)



Figur 20(g)

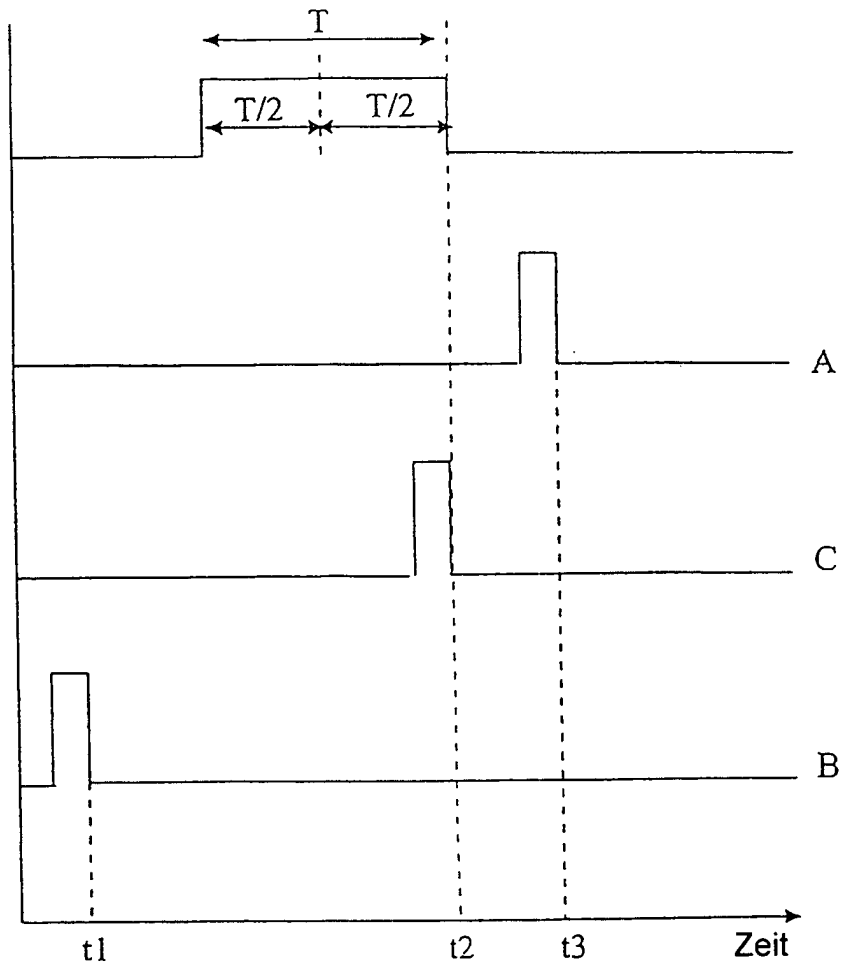


Figur 22

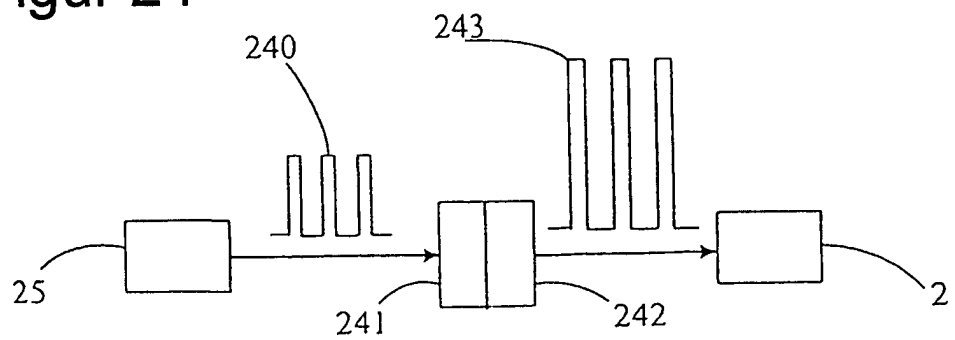




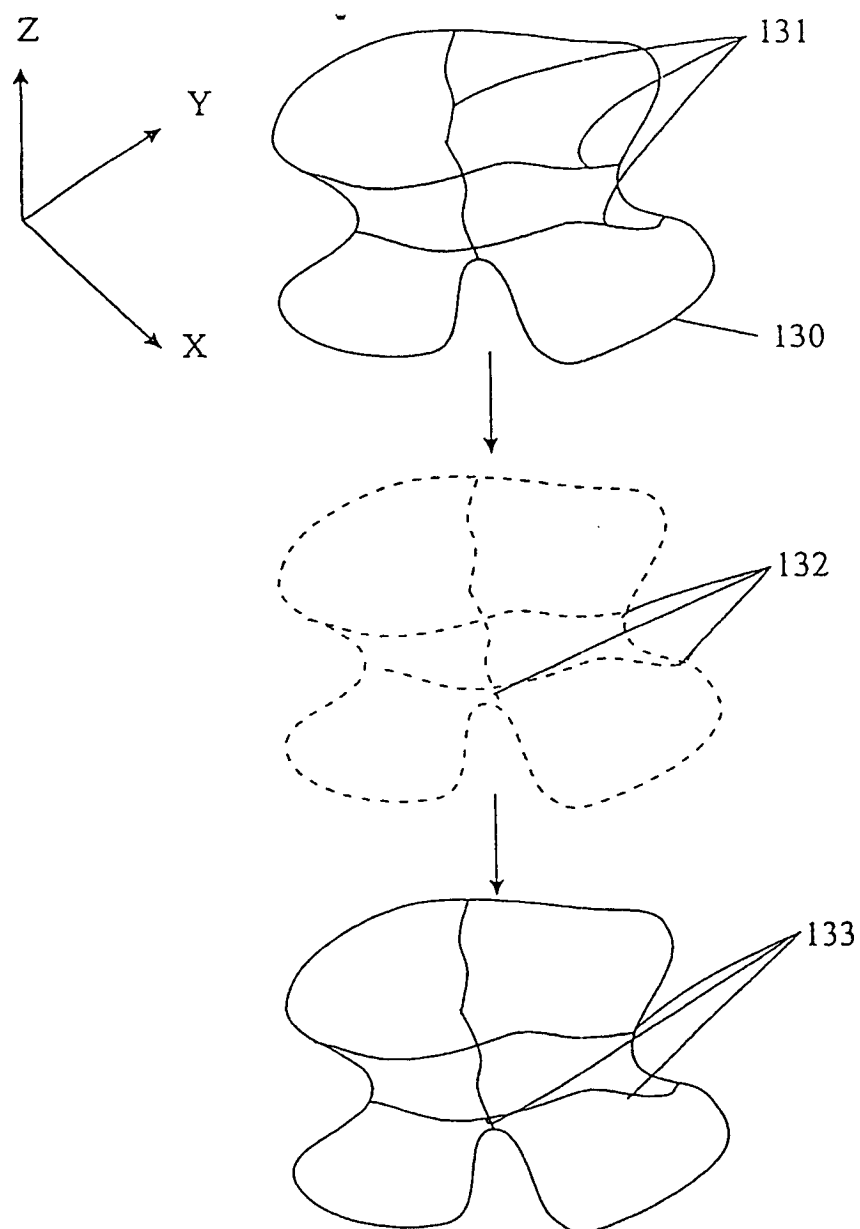
Figur 23



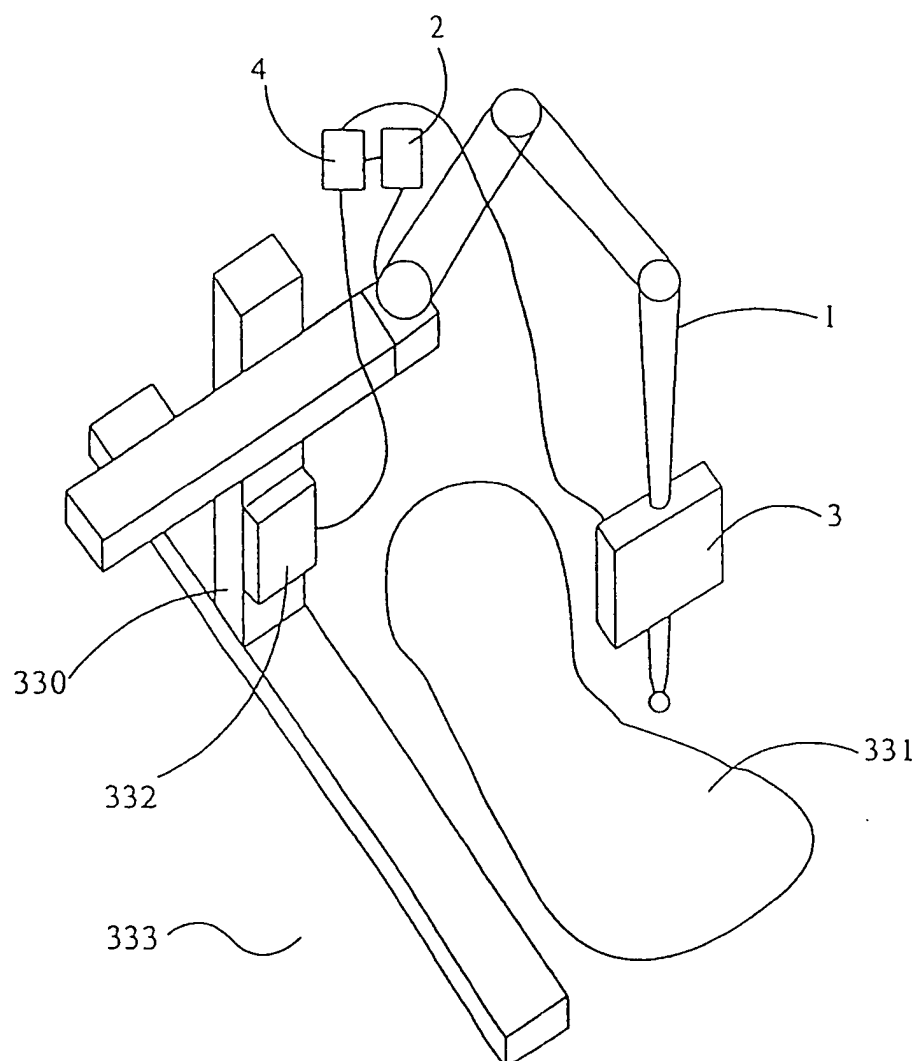
Figur 24



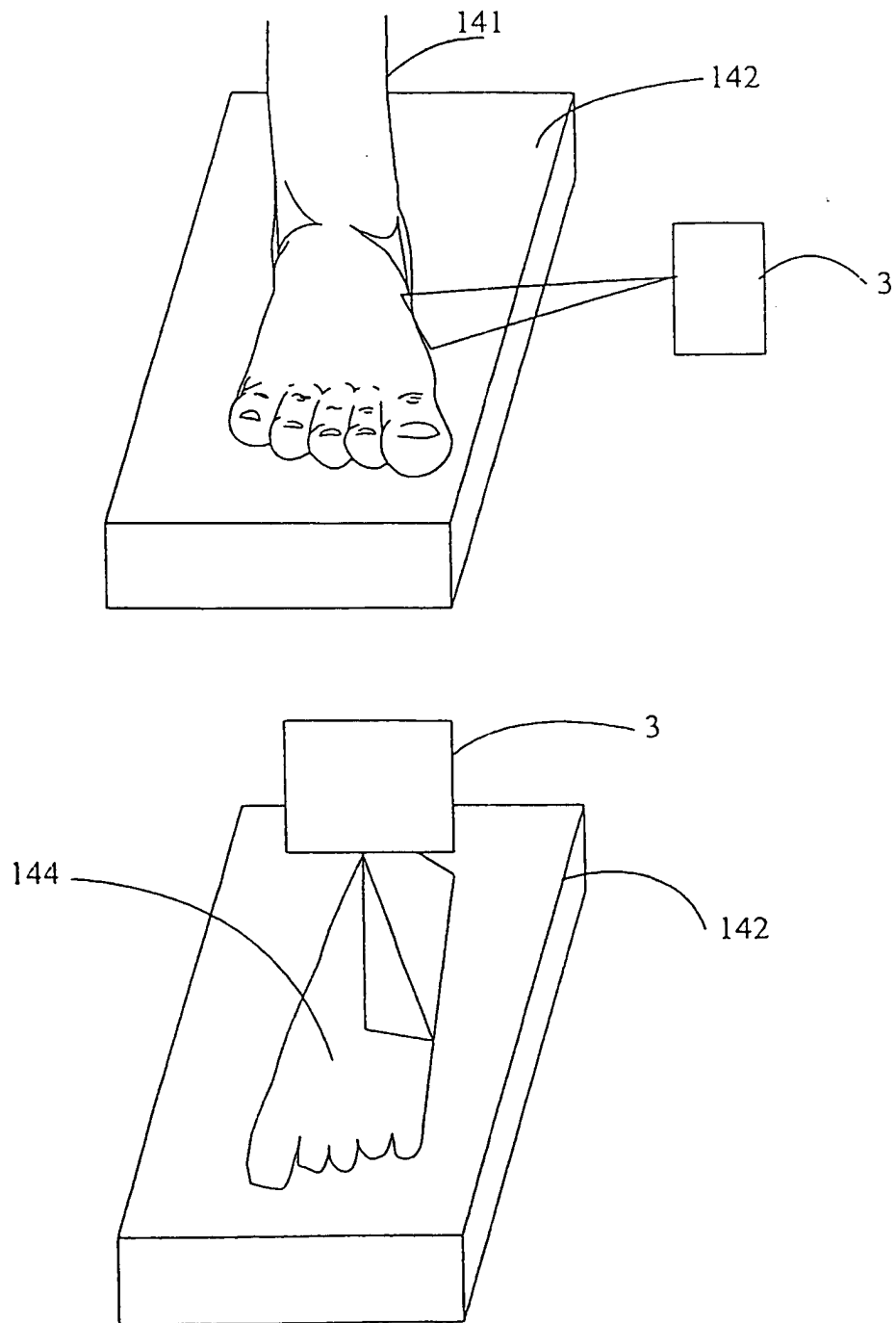
Figur 25



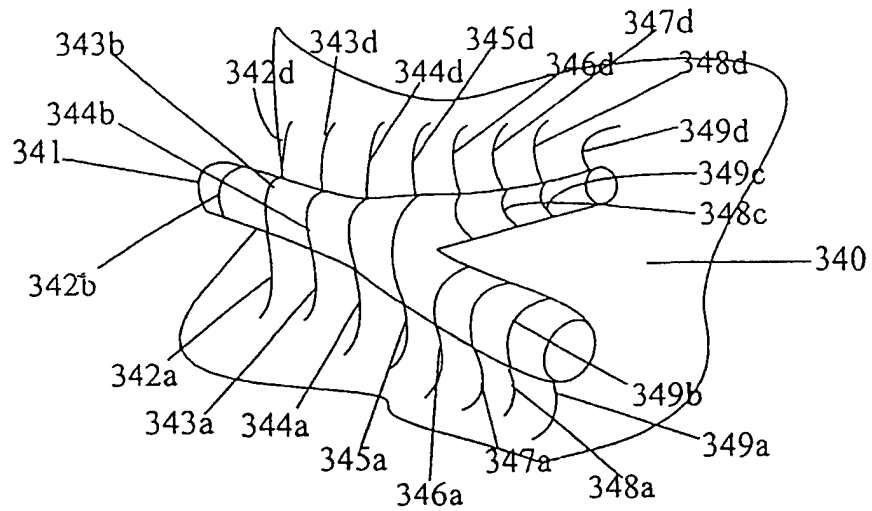
Figur 26(a)



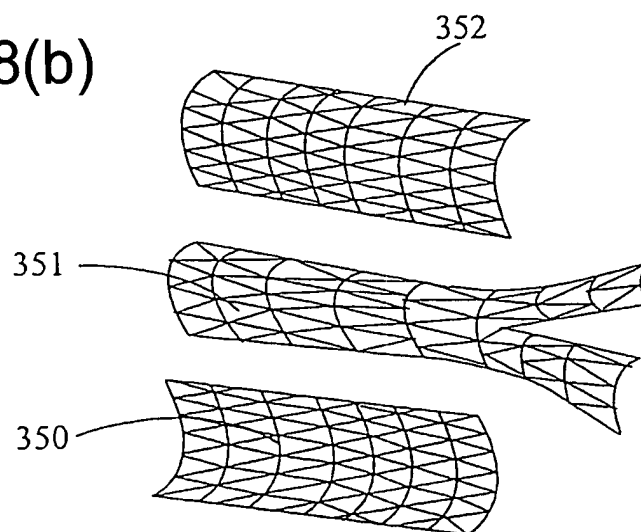
Figur 27



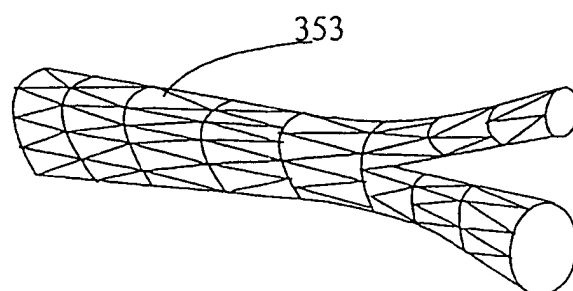
Figur 28(a)



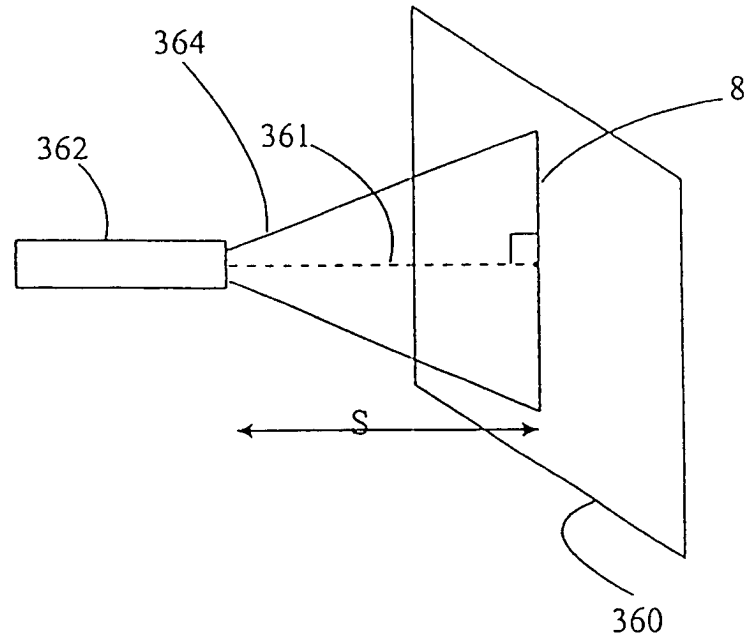
Figur 28(b)



Figur 28(c)



Figur 29(a)



Figur 29(b)

