(19) **Bundesrepublik Deutschland**
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 695 35 523 T2** 2008.04.03

(12) # Übersetzung der europäischen Patentschrift

(97) **EP 0 758 469 B1**
(21) Deutsches Aktenzeichen: **695 35 523.6**
(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/US95/05669**
(96) Europäisches Aktenzeichen: **95 919 030.7**
(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 1995/030964**
(86) PCT-Anmeldetag: **03.05.1995**
(87) Veröffentlichungstag der PCT-Anmeldung: **16.11.1995**
(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **19.02.1997**
(97) Veröffentlichungstag der Patenterteilung beim EPA: **27.06.2007**
(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **03.04.2008**

(51) Int Cl.[8]: ***G06K 9/00*** (2006.01)
B25J 9/16 (2006.01)

(30) Unionspriorität:
239086 **05.05.1994** **US**

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AT, BE, CH, DE, DK, ES, FR, GB, GR, IE, IT, LI, LU, MC, NL, PT, SE

(73) Patentinhaber:
SRI International, Menlo Park, Calif., US

(72) Erfinder:
GREEN, Philip S., Redwood City, CA 94062, US

(74) Vertreter:
Bosch, Graf von Stosch, Jehle Patentanwaltsgesellschaft mbH, 80639 München

(54) Bezeichnung: **VERFAHREN FÜR TELE-MANIPULATION UND TELE-ANWESENHEIT**

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

HINTERGRUND DER ERFINDUNG

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft die Telemanipulation unter Verwendung der Telepräsenz und insbesondere Anwendungen der Telemanipulation bei der laparoskopischen Chirurgie.

[0002] Ein Telemanipulationssystem erlaubt es einem Operator, Objekte, die sich in einem Arbeitsraum befinden, ausgehend von einer fernen Steueroperatorstation aus zu manipulieren. So wird zum Beispiel bei einem laparoskopischen Abdominalchirurgieverfahren der Bauch (das Abdomen) des Patienten mit Gas aufgeblasen, und Kanülen werden durch kleine Einschnitte eingeführt, um Eintrittsöffnungen für laparoskopische chirurgische Instrumente bereitzustellen. Laparoskopische chirurgische Instrumente umfassen eine Bilderfassungseinrichtung zum Betrachten des Operationsbereichs und Arbeitswerkzeuge wie etwa Zangen, Klemmen, Pinzetten oder Scheren. Die Arbeitswerkzeuge sind denen ähnlich, die bei der offenen Chirurgie verwendet werden, mit der Ausnahme, dass das Arbeitsende jedes Werkzeugs von seinem Handgriff durch einen Verlängerungsschlauch getrennt ist. Der Chirurg führt den chirurgischen Eingriff durch, indem er die Instrumente durch die Kanülen gleiten läßt bzw. schiebt und diese dann im Innern des Abdomens manipuliert, während er auf ein angezeigtes Bild des Inneren des Abdomens Bezug nimmt. Operationen mittels Telepräsenz, das heißt, von einem fernen Ort aus mit Hilfe einer Fernsteuerung der chirurgischen Instrumente, ist ein nächster Schritt. Ein Chirurg ist idealerweise in der Lage, eine Operation mittels Telepräsenz durchzuführen, die, anders als andere Techniken der Fernmanipulation, dem Chirurgen das Gefühl gibt, dass er die direkte Kontrolle über die Instrumente besitzt, obwohl er nur die Fernsteuerung der Instrumente und eine Ansicht über das angezeigte Bild hat.

[0003] Die Wirksamkeit der Telepräsenz leitet sich in großem Maße von der Illusion ab, dass die fernen Manipulatoren von dem Operator des Systems als aus den Handsteuerungsvorrichtungen herauskommend wahrgenommen werden, die sich an der fernen Operatorstation befinden. Wenn die Bilderfassungseinrichtungen, wie z.B. eine Kamera oder ein Laparoskop, in einer Position hinsichtlich der Manipulatoren angeordnet werden, die sich beträchtlich von der anthropomorphen Beziehung der Augen und der Hände unterscheidet, dann werden die Manipulatoren so erscheinen, als ob sie sich entfernt von den Handsteuerungen des Operators befinden. Dies wird bewirken, dass sich die Manipulatoren in einer ungeschickten Weise relativ zu der Betrachtungsposition bewegen werden, was die Fähigkeit des Operators, diese mit Geschicklichkeit und Schnelligkeit zu steuern, unterbinden wird. Aber es ist bei Anwendungen wie etwa der laparoskopischen Chirurgie oftmals nicht vermeidbar, das Laparoskop zu bewegen, um das bestmögliche Bild der Bauchhöhle zu erhalten.

[0004] Das US-Patent mit der Nummer 5,182,641 lehrt ein System für die Echtzeit-Videobild-Anzeige für Roboter oder eine Fernteleoperation von Fahrzeugen. Das System weist wenigstens einen Fernsehmonitor zur Anzeige eines Fernsehbildes von einer ausgewählten Kamera und die Fähigkeit auf, eine Kamera für die Bildanzeige auszuwählen.

[0005] Die internationale Patentanmeldung mit der Nummer WO 93/05479 offenbart ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Kalibrierung eines Werkzeugsteuerrahmens eines Roboters im Hinblick auf einen bekannten Kalibrierungsbezugsrahmen, der an einem Roboterglied angebracht ist.

[0006] Deshalb besteht ein Bedarf an einem Verfahren zur Bereitstellung des Gefühls der direkten Handsteuerung des fernen Manipulators für den Operator, selbst in der Gegenwart einer beträchtlich verlagerten bildgebenden Vorrichtung derart, dass sich der Operator fühlt, als ob er den Arbeitsraum so betrachtet, wie wenn er tatsächlich präsent wäre.

ZUSAMMENFASSUNG DER ERFINDUNG

[0007] Gemäß einer Ausführungsform der Erfindung ist ein Telemanipulationssystem bereitgestellt, wie es in Anspruch 1 definiert ist. Bevorzugte Merkmale des Systems sind in den Ansprüchen definiert, die von Anspruch 1 abhängen.

[0008] Gemäß einer weiteren Ausführungsform der Erfindung ist ein Verfahren zum Manipulieren von Objekten bereitgestellt, wie es in Anspruch 21 definiert wird. Bevorzugte Merkmale des Verfahrens sind in den Ansprüchen definiert, die von Anspruch 21 abhängen.

[0009] Gemäß einem alternativen Ausführungsbeispiel der Erfindung ist ein Telemanipulationssystem zum

Manipulieren von Objekten, die sich in einem Arbeitsraums an einem fernen Arbeitsplatz befinden, durch einen Operator an einer Operatorstation, wie etwa bei einem Fernoperationssystem, bereitgestellt, wobei der ferne Arbeitsplatz einen Manipulator oder ein Paar von Manipulatoren jeweils mit einem Endeffektor zur Manipulation eines Objektes in dem Arbeitsraum, wie etwa einer Körperhöhle, einen Controller, der eine Handsteuerung einschließt, an der Steueroperatorstation für die Fernsteuerung der Manipulatoren, eine Bilderfassungseinrichtung, wie etwa eine Kamera, zur Aufnahme in Echtzeit eines Bildes des Arbeitsraums, und eine Bilderzeugungseinrichtung zum Reproduzieren eines betrachtbaren Bildes mit ausreichendem Feedback aufweist, um dem Steueroperator den Anschein einer Echtzeitkontrolle bezüglich des Objekts in dem Arbeitsraum zu geben, wobei bei der Verbesserung Einrichtungen zum Abtasten der Position der Bilderfassungseinrichtung relativ zu dem Endeffektor bereitgestellt sind und Einrichtungen zum Transformieren des betrachtbaren Echtzeitbildes in ein perspektivisches Bild mit korrelierter Manipulation des Endeffektors durch die Handsteuerungseinrichtungen derart bereitgestellt sind, dass der Operator den Endeffektor und den Manipulator so manipulieren kann, als ob er den Arbeitsraum genau so betrachtet, wie wenn er selber tatsächlich wirklich präsent wäre. Mit wirklich präsent ist gemeint, dass die Präsentation eines Bildes ein tatsächliches perspektivisches Bild ist, das den Blickpunkt eines Operators simuliert. Eine Bildtransformation gemäß der Erfindung umfasst die Rotation, die Verschiebung und die perspektivische Korrektur.

[0010] Bevorzugte Ausführungsbeispiele der Erfindung werden unter Bezugnahme auf die nachfolgende ausführliche Beschreibung in Verbindung mit den beigefügten Zeichnungen besser verständlich.

KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

[0011] Fig. 1A ist eine Seitenansicht einer Fernoperatorstation und einer Arbeitsplatzstation in einem Telemanipulationssystem gemäß der vorliegenden Erfindung.

[0012] Fig. 1B ist eine perspektivische Ansicht einer Fernoperatorstation und einer Arbeitsplatzstation, die für die stereoskopische Betrachtung in einem Telemanipulationssystem gemäß der vorliegenden Erfindung ausgelegt sind.

[0013] Fig. 2 ist eine schematische perspektivische Ansicht eines spezifischen Ausführungsbeispiels der Erfindung, bei dem die Bilderfassungseinrichtung relativ zu dem Blickpunkt eines Operators, der die Manipulatoren verwendet, zentriert und normalisiert ist.

[0014] Fig. 3 ist eine schematische perspektivische Ansicht eines spezifischen Ausführungsbeispiels der Erfindung, bei dem die Bilderfassungseinrichtung relativ zu dem Blickpunkt eines Operators, der die Manipulatoren verwendet, seitlich verlagert ist.

[0015] Fig. 4 ist eine schematische perspektivische Ansicht eines spezifischen Ausführungsbeispiels der Erfindung, bei dem sich die Bilderfassungseinrichtung an einer niedrigeren Position relativ zu dem Blickpunkt eines Operators, der die Manipulatoren verwendet, befindet.

[0016] Fig. 5A ist eine Aufrissansicht der Linsen einer stereoskopischen Bilderfassungseinrichtung, bei der sich die Linsen in einer normalisierten Position relativ zu dem Blickpunkt eines Operators, der die Manipulatoren verwendet, befinden.

[0017] Fig. 5B ist eine Aufrissansicht der Linsen einer stereoskopischen Bilderfassungseinrichtung, bei der die Linsen relativ zu dem Blickpunkt eines Operators, der die Manipulatoren verwendet, gedreht sind.

[0018] Fig. 6A ist eine Ansicht von oben eines Bildes eines fernen Manipulators in einem Telemanipulationssystem, das ein eingeblendetes stereografisches Vierpunkte-Koordinatenelement vor der Kalibrierung zeigt.

[0019] Fig. 6B ist eine Ansicht von oben eines Bildes eines fernen Manipulators in einem Telemanipulationssystem, das ein eingeblendetes stereografisches Vierpunkte-Koordinatenelement nach der Kalibrierung zeigt.

[0020] Fig. 7A ist eine Ansicht von oben eines Bildes eines fernen Manipulators in einem Telemanipulationssystem, das den Verschiebungswinkel in der Horizontalen der Bilderfassungseinrichtung relativ zu den Manipulatoren zeigt.

[0021] Fig. 7B ist eine vergrößerte Ansicht eines Teils von **Fig.** 4A, die die kombinierte Auswirkung auf die Position des Endeffektors eines Manipulators nach einer seitlichen Verschiebung zeigt.

[0022] Fig. 8 ist eine geometrische Darstellung des Bildes eines Manipulators als eine Projektion einer Handsteuerung.

[0023] Fig. 9 ist eine geometrische Darstellung des tatsächlichen Manipulators, dessen Bild in Fig. 8 dargestellt ist.

BESCHREIBUNG SPEZIFISCHER AUSFÜHRUNGSBEISPIELE

[0024] Fig. 1A zeigt ein Telemanipulationssystem **10** gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung mit einer fernen Operatorstation **12**, an der ein Operator **14** (zum Beispiel ein Chirurg) die Telemanipulation bei einem Objekt an einer Arbeitsplatzstation **16** durchführen kann. Die ferne Station **12** umfasst eine Videoanzeige **20** für den Operator **14**, um den Arbeitsplatz und einen virtuellen Arbeitsraum **22** zu betrachten, an dem der Operator **14** die tatsächlichen Manipulationen ausführt, indem er Handsteuerungseinrichtungen **24**, **26** ergreift, wie z.B. die Handgriffe von chirurgischen Instrumenten, die mit Positionssensoren **51**, **55** verbunden sind. Die Arbeitsplatzstation **16** umfasst eine Bilderfassungseinrichtung **19**, die eine Sensoreinrichtung **21** mit einer Kameralinse **28** einer Kamera oder eines Endoskops und die Voraussetzung einschließt, dass eine Bilderfassungseinrichtung **19** mit dieser Linse assoziiert ist, die ein Bild eines Objekts erfasst, das sich in dem Arbeitsraum **30** befindet. (Ein Endoskop würde sich in der Körperhöhle befinden.) Die Manipulatoren **32**, **34** erlauben die Manipulation des Objekts in dem Arbeitsraum **30** korreliert mit einem angezeigten Bild durch die Verwendung von Endeffektoreinrichtungen **39**, **41**.

[0025] Das Bild, das an dem Arbeitsplatz **16** erfasst wird, wird durch eine Anzahl von Stufen übertragen, die dem Operator **14** ein Echtzeitbild des Objekts in dem Arbeitsraum **30** präsentieren. Insbesondere stellt die Sensoreinrichtung **21**, die optische Bilderfassungseinrichtungen **19** einschließt, eine Ansicht der Manipulatoren **32**, **34** durch eine Kameralinse **28** bereit, wobei solche Bildinformationen durch den Pfad **13** zu einem Bildprozessor **23** übermittelt werden. Zusätzlich können Bildsensorpositionsinformationen (Kameraposition) auf dem Pfad **63** zu dem Koordinatentransformator **43** übermittelt werden. (Für eine feststehende Kamera können die Kamerapositionsinformationen vorher festgelegt werden). Des Weiteren fühlen die mechanischen Positionsabfühleinrichtungen **59**, **61** die Position der Manipulatoren **32**, **34** mechanisch ab und übermitteln die Positionsinformationen über den Pfad **157** zu dem Koordinatentransformator **43**.

[0026] Der Bildprozessor **23** umfasst eine Rotations- und Verschiebeeinrichtung **25**, eine perspektivische Korrektureinrichtung **29** und eine Kalibrierungseinrichtung **27**. Der Rotator dient zum Drehen des Bildes und der Verschieber dient zum Verschieben des gedrehten Bildes. Der perspektivische Korrektor **29** dient primär dazu, das Bild zu vergrößern, und kann einige Senkrechtschwenkungskorrekturen umfassen. Der Kalibrator **27** kann verschiedene Funktionen aufweisen, je nach Abhängigkeit von dem Typ an Bildeingabe. Er wird vor allem dazu verwendet, das Bild auf ein bekanntes Bezugskoordinatensystem zu kalibrieren, um einen Operator in die Lage zu versetzen, Bewegungen der Handsteuerungen und der Manipulatoren zu koordinieren. Nachdem das Bild eine Transformation durch einen oder mehrere dieser Funktionsblöcke durchlaufen hat, werden die Pixeldaten auf dem Pfad **15** zu einem Bildgenerator **31** übermittelt, der eine Videoanzeige **20** steuert, die in diesem Ausführungsbeispiel eine monoskopische Vorrichtung ist, und Daten über das Bild werden zu dem Koordinatentransformator **43** weiter übermittelt, wodurch jegliche verarbeiteten Bilddaten, die potentiell die Steuerung der Manipulatoren beeinflussen können (z.B. Vergrößerung, Rotation, Verschiebung) für die Steuerung der Manipulatoren zur Verfügung gestellt werden. Die Einzelheiten der Prozesse, die beeinflusst werden können, werden unten vor allem im Hinblick auf die Kalibrierung erläutert werden.

[0027] Der Koordinatentransformator **43** ist der Haupt-Prozessor der Positionsinformationen. Kamerapositionsinformationen, Manipulatorpositionsinformationen und Handsteuerungspositionsinformationen werden darin empfangen und verarbeitet. Insbesondere die Positionen der Handsteuerungen **24**, **26** werden von den Positionssensoren **51**, **51** abgefühlt und über den Pfad **47** zu dem Koordinatentransformator **43** übermittelt. Nach der Transformation und der Verarbeitung in dem Koordinatentransformator **43** werden die Steuerinformationen an einen Positionsverfolgungsservo **45** angelegt, der die Manipulatoren **32**, **34** mit den Endeffektoren **39**, **41** antreibt und steuert. Die Operation jedes dieser Blöcke wird ausführlicher beschrieben werden.

[0028] Während des Betriebs erfasst die Kameralinse **28** das Bild des Objekts in dem tatsächlichen Arbeitsraum **30** in einer spezifischen Ausrichtung in der Bilderfassungseinrichtung **19**. Die Videoanzeige **20** zeigt dieses Bild so an, dass der Operator **14** das Objekt betrachten kann, während es manipuliert wird. Der Operator **14** kann dann Handsteuerungseinrichtungen **24**, **26** ergreifen, die sich in dem sichtbaren Arbeitsraum **22** befinden, um die gewünschten Manipulationen auszuführen. Die Handsteuerungseinrichtungen **24**, **26** an der fernen Station **12**, die sich unter der Anweisung des Positionsverfolgungsservos **45** befinden, steuern die Mani-

pulatoren **32**, **34** an der Arbeitsplatzstation **16**, die die eigentliche Manipulation des Objekts in dem Arbeitsraum **30** durchführen. Der tatsächliche Arbeitsraum **30** wird somit effektiv zu dem fernen Operator **14** zurückprojiziert, um so die Illusion zu erzeugen, das er das Objekt, das sich in dem Arbeitsraum **30** befindet, direkt erreicht und direkt in es hineinschaut und direkt steuert. Auf korrekte Weise projiziert führt dies zu natürlichen und spontanen Steuerbewegungen durch den Operator **14**, selbst wenn er sich in einem anderen Raum oder an einer anderen extrem weit entfernten Stelle befindet.

[0029] Die Probleme, die von der vorliegenden Erfindung angegangen werden, ergeben sich aus der Situation, in der die Kameralinse in dem realen Arbeitsraum **30** nicht an der gleichen Position relativ zu den Manipulatoren **32**, **34** wie die Augen des Steueroperators angeordnet ist, die das projizierte Bild in dem "sichtbaren" bzw. "virtuellen" Arbeitsraum **22** relativ zu den Handsteuerungseinrichtungen **24**, **26** betrachten. Eine Lösung dafür wird von der vorliegenden Erfindung bereitgestellt.

[0030] Das Telemanipulationssystem nach der vorliegenden Erfindung kann auch so ausgelegt werden, dass es sich an eine stereoskopische Betrachtungsweise anpasst. Fig. 1B zeigt alle Elemente von Fig. 1A sowie zusätzlich eine zweite Kameralinse **36** und Bilderfassungseinrichtung **35**. Die beiden Kameralinsen **28** und **36** können um etwa 10° voneinander getrennt sein, welches die gleiche interokulare Betrachtungsdisparität ist, die man erfährt, wenn man ein Gesichtsfeld mit einem Abstand von 40 cm betrachtet. Das Stereobild wird auf einem Stereovideoanzeigemonitor **38** angezeigt (z.B. unter Verwendung eines elektronisch geschalteten Polarisators **37** über den Bildschirm) und durch kreuzpolarisierte stereoskopische Linsen **40** betrachtet, wodurch dem fernen Operator **14** ein natürliches Bild angeboten wird, so dass der Operator das korrekte visuelle Feedback erfährt, wie wenn er den tatsächlichen Arbeitsraum **30** erreicht und direkt in diesen hineinblickt und direkt die sich darin befindlichen Objekte manipuliert. Die Einzelheiten des Systems werden im Folgenden erläutert.

[0031] Fig. 2 ist eine schematische perspektivische Ansicht der Elemente der Arbeitsplatzstation **16** in dem Arbeitsraum **30** des Telemanipulationssystems, wobei Merkmale von **Fig.** 1 gezeigt werden, die sich in einem Regelkreis befinden. Der Systemoperator befindet sich an einer fernen Station, um Objekte zu manipulieren, die sich an einem Mittelpunkt **50** in dem Arbeitsraum **30** befinden. In dem monoskopischen System erfasst die Sensoreinrichtung **21** mit der Kameralinse **28** und der Bilderfassungseinrichtung **19** ein Echtzeitbild des Objekts. Der Operator **14** verwendet doppelte Handsteuerungseinrichtungen **24**, **26**, um jeweils den linken Manipulator **32** und den rechten Manipulator **34** zu steuern, die eine Fernmanipulation des Objekts in dem Arbeitsraum **30** erlauben. Für die Handsteuerungseinrichtungen **24**, **26** und die Manipulatoren **32**, **34** gibt es in diesem Beispiel einen festen Drehpunkt, um denn eine bidirektionale Winkelbewegung bewirkt werden kann, zusammen mit einer teleskopartigen Verlängerungsfähigkeit für jeden bzw. jede der Manipulatoren und Handsteuerungen. Die Korrelation zwischen den Handsteuerungseinrichtungen **24**, **26** und den Manipulatoren **32**, **34**, kombiniert mit dem Bild, das von der Kameralinse **28** erfasst wird, stellen einen ausreichenden Feedback bereit, um den Steueroperator mit dem Anschein einer Echtzeitsteuerung bezüglich des Objekts in dem Arbeitraum zu versehen (eine weitere Verbesserung ist mit einem taktilen Feedback möglich). Sowohl der linke Manipulator **32** als auch der rechte Manipulator **34** sind in diesem Beispiel um 30° im Hinblick auf eine willkürliche Ausrichtungsebene erhöht, die eine Mittellinienachse **52** des Arbeitsraums **32** umfasst, um eine typische Positionierung eines Objekts in dem echten lokalen Arbeitsraum **30** zu simulieren.

[0032] Während des Betriebs befindet sich die Kameralinse **28** in der seitlichen 0°-Position im Hinblick auf die Mittellinienachse **52**, so dass sich die Kameralinse **28** zwischen dem linken Manipulator **32** und dem rechten Manipulator **34** befindet. Die Fläche der Kameralinse **28** ist zum Beispiel in einem 45° Winkel im Hinblick auf die Ebene erhöht, die die Mittellinienachse **52** und die Grundlinie **53** enthält. Diese Kameraposition und -ausrichtung ist eine enge Annäherung an die tatsächliche Augenposition im Hinblick auf die Manipulatoren **32** und **34** und repräsentiert eine Grund- oder Bezugsposition. Das Bild, das von der Kameralinse **28** eingefangen wird, erweckt den Anschein, als ob der Operator auf den Mittelpunkt **50** schaut, während er über den Manipulatoren **32** und **34** steht, und zwar mit einem Betrachtungswinkel von 45° in den Arbeitsraum hinein. Sowohl der linke Manipulator **32** als auch der rechte Manipulator **34** erscheinen am unteren Ende des angezeigten Bildes (proximal zu den Handsteuerungen des Operators), was ein starkes Gefühl der Telepräsenz hervorruft, was bedeutet, das der Operator das Gefühl einer direkten Kontrolle der Manipulatoren **32** und **34** erfährt, was eine Steuerung mit Geschicklichkeit und Schnelligkeit erlaubt, insbesondere dann, wenn es ein taktiles Feedback von den Manipulatoren **32**, **34** zu den Handsteuerungseinrichtungen **24**, **26** gibt.

[0033] Bei einer Telemanipulationsanwendung, bei der das Positionieren von Elementen aufgrund von Hindernissen schwierig ist, ist es oftmals notwendig, die Kameralinse **28** in verschiedene Positionen zu bewegen, was zu einer anderen Ansicht des Objekts an dem Mittelpunkt **50** führt. Unter Bezugnahme auf Fig. 3 ist eine schematische perspektivische Ansicht der Elemente in dem Arbeitsraum **30** der Arbeitsplatzstation **16** eines

monoskopischen Telemanipulationssystems gezeigt, in dem die Position der Kameralinse **28** um einen Winkel θ **58** seitlich in der horizontalen Ebene weg von der Mittellinienachse **52** gedreht ist. Nach der Rotation der Kameralinse **28** sind der linke Manipulator **32** und der rechte Manipulator **34** immer noch nach unten in einem Winkel von 30° relativ zu der Ebene geneigt, die die Mittellinienachse **52** und die Grundlinie **53** enthält, und die Kameralinse **28** ist immer noch in einem Winkel θ oberhalb der Ebene positioniert, die von der Mittellinienachse **52** und der Grundlinie **53** gebildet wird. Um ein Gefühl der Telepräsenz bei dem Operator hervorzurufen, ähnlich wie bei dem Fall, bei dem die Kameralinse **28** direkt über den Manipulatoren **32** und **34** angeordnet ist (wie in Fig. 2), wird gemäß der Erfindung das erfasste Bild, das von der Kameralinse **28** projiziert wird, um eine visuelle Achse/Sehachse **54** durch den Mittelpunkt der Kameralinse **28** gedreht. Dadurch wird die Rotation um die "vertikale" Achse U kompensiert, um eine statische Neuausrichtung der sichtbaren bzw. virtuellen Manipulatorpositionen zu bewirken.

[0034] Es sollte verstanden werden, dass die Kameralinse **28** und die Bilderfassungseinrichtung einen vollen Rotationsbereich um die vertikale Achse U genießen können, und dass die Winkel relativ zu den Bezugsebenen und dergleichen der Manipulatoren und der Kamera von den Beschränkungen der Betriebsumgebung diktiert werden. Außerdem kann die Kameralinse **28** in verschiedenen Winkeln relativ zu der Ebene positioniert werden, die von der Mittellinienachse **52** und der Grundlinie **53** gebildet wird. So zeigt zum Beispiel die Fig. 4 die Kameralinse **28** in einer Position in einer Höhe von 15° oberhalb der (willkürlichen) Bezugsebene, die von der Mittellinienachse **52** und der Grundlinie **53** gebildet wird. Bei dieser Ausrichtung befindet sich die Kameralinse **28** unterhalb der Manipulatoren **32**, **34**.

[0035] Wenn das Bild rein monoskopisch ist, wie es in Fig. 1A dargestellt ist, kann das System eine statische Neuausrichtung der Manipulatoren **32** und **34** um eine Achse **54** durch einen Punkt, insbesondere den Mittelpunkt **50** bewirken, indem das digitale Bild mittels der Rotationseinrichtung **25** gedreht wird. Fig. 3 zeigt die relevanten Rotationswinkel. Der Winkel Φ **56** bezeichnet den Neigungswinkel der Sehachse **54** der Kameralinse **28** unter der vertikalen Achse U. Der Winkel θ **58** bezeichnet die Rotation der Position der Kameralinse **28** in der horizontalen Ebene (gebildet von den Linien **52**, **53**) weg von der Mittellinienachse **52** relativ zu dem Mittelpunkt **50**.

[0036] Die Rotationseinrichtung **25** bewirkt eine statische Neuausrichtung der Manipulatoren durch das Drehen des Echtzeitbildes Pixel um Pixel um einen Winkel, der etwa gleich -θ ist, in Übereinstimmung mit bekannten Verfahren. Nachdem diese Operation fertiggestellt ist, erscheinen der linke Manipulator **32** und der rechte Manipulator **34** im unteren Teil des angezeigten Bildes (untere Hälfte des projizierten Bildschirms). Die Kameralinse **28** bleibt stationär, und das angezeigte Bild wird durch die Bildmanipulation gedreht. Es sei angemerkt, dass dann, wenn Handsteuerungseinrichtungen **24**, **26** an der Operatorstation oberhalb des Blickpunkts des Steueroperators positioniert sind, die Rotation des angezeigten Bildes das angezeigte Bild bis zu dem Punkt korrigieren wird, an dem die Manipulatoren oben in dem angezeigten Bild erscheinen (obere Hälfte des projizierten Bildschirms). In beiden Fällen erlaubt es die Transformation des angezeigten Bildes dem Operator, die Manipulatoren so zu betrachten, als ob diese aus den Handsteuerungen des Operators heraustreten. Das Remapping des Bildes wird durchgeführt, bevor die tatsächliche Steuerung bewirkt werden kann.

[0037] Zusätzlich zu dem Bewirken einer statischen Neuausrichtung durch digitale Bildtransformation kann eine Transformationseinrichtung **25** eine dynamische Synchronisation von virtuellen Manipulatorendenpositionen mit Handsteuerungspositionen bewirken, indem die nachfolgende Koordinatentransformation bei den Videobilddaten durchgeführt wird. Die tatsächliche Position der Manipulatorenden in dem Arbeitsraum **30** kann in eine virtuelle Position in dem angezeigten Bild transformiert werden, so dass die Manipulatoren so erscheinen werden, als ob sie sich starr mit den Handsteuerungen des Operators verbunden bewegen. Das Ändern der virtuellen Position der Manipulatorenden verbessert die Geschicklichkeit des Operators bei der Handhabung des Objekts in dem Arbeitsraum **30**. Da der Endpunkt des Endeffektors des Manipulators bekannt ist, kann der Punkt (a, b, c) in Bezug zu der Winkelposition und der Länge des Manipulators gebracht werden, und der Punkt (p, q, r) kann in Bezug zu den gleichen Parametern relativ zu der Handsteuerung gebracht werden, und zwar unter Verwendung bekannter trigonometrischer Beziehungen zwischen Vektoren und ihren Endpunkten. Somit gilt:

$$\begin{vmatrix} p \\ q \\ r \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos\theta' & \sin\theta' & 0 \\ -\sin\theta' & \cos\theta' & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \cos\Phi & 0 & \sin\Phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\Phi & 0 & \cos\Phi \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} a \\ b \\ c \end{vmatrix}$$

(Gleichung 1)

[0038] In Verbindung mit der Transformation, die mit der obigen Gleichung assoziiert ist, wird das Bild um einen Winkel θ' gedreht, der von dem Operator ausgewählt wird, um die virtuelle Position der Manipulatoren in eine tatsächliche Deckung mit den Handsteuerungen zu bringen. Es ist eine Beobachtung, dass der Winkel θ' ≈ -θ. Diese Transformation beschreibt die Beziehung zwischen der Position des Punktes, der von den Endeffektoreinrichtungen bei (a, b, c) (für jede Endeffektoreinrichtung) repräsentiert wird, relativ zu dem Punkt (p, q, r) des entsprechenden Endes des Manipulators in dem virtuellen Arbeitsraum in dem angezeigten Bild auf der Videoanzeige **20**.

[0039] Ein anderes Verfahren zum Erzielen einer statischen Neuausrichtung der Manipulatorpositionen liegt darin, die Bilderfassungseinrichtung um ihre Sehachse zu drehen. Unter erneuter Bezugnahme auf das monoskopische System, das in Fig. 1A und in Fig. 3 veranschaulicht ist, wird die Kameralinse **28** um ihre eigene Sehachse **54**, eine Achse senkrecht zu der Ebene der Kameralinse **28**, bis zu dem Punkt gedreht, an dem der linke Manipulator **32** und der rechte Manipulator **34** in dem unteren Teil des angezeigten Bildes (untere Hälfte des projizierten Bildschirms) erscheinen. Es sei erneut angemerkt, dass dann, wenn die Handsteuerungseinrichtungen an der Operatorstation oberhalb des Blickpunkts des Steueroperators positioniert sind, die Drehung der Kameralinse **28** und der Bilderfassungseinrichtung **19** das angezeigte Bild bis zu dem Punkt korrigieren wird, an dem die Manipulatoren in dem oberen Teil des angezeigten Bildes (obere Hälfte des projizierten Bildschirms) erscheinen.

[0040] Zur Beibehaltung des stereoskopischen Effekts können in dem Fall der stereoskopischen Bildgebung, wie sie in Fig. 1B dargestellt ist, die Rotationen nicht um separate Achsen durch jede Kameralinse ausgeführt werden, sondern (unter Bezugnahme auf Fig. 5A und Fig. 5B) müssen zusammen um eine einzige Achse ausgeführt werden, die von jeder Linse versetzt ist. Insbesondere wird diese Rotation senkrecht zu der Mittelachse **57**, die durch den Mittelpunkt **50** verläuft, und einem willkürlichen Punkt auf der Mittelachse **57** zwischen den stereoskopischen Kameralinsen **28** und **36** (Fig. 5A und Fig. 5B) ausgeführt. Diese Achse ist der Sehachse **54** ähnlich, die in Verbindung mit Fig. 2 beschrieben wurde. Unter Bezugnahme auf Fig. 5A sind die Linsen einer stereoskopischen Vorrichtung in ihren Anfangspositionen gezeigt. Die Mittelachse **57** zeigt die feste Beziehung jeder Linse des Kamerapaars und verläuft parallel zu einer Bezugsachse **59** parallel zu einer Achse in der Ebene, die von den Manipulatoren **32**, **34** gebildet wird, mit einer Kreuzungsstelle an dem Mittelpunkt **50**, wobei die Achse senkrecht zu einer Linie verläuft, die die Manipulatoren halbiert und durch den Mittelpunkt **50** verläuft. Um das angezeigte Bild durch die Rotation der Bilderfassungseinrichtung neu auszurichten, wird die Mittelachse **57** relativ zu einer Bezugsebene **59**, die durch den Mittelpunkt verläuft, geneigt, wobei diese Ebene die Bezugsachse **59** einschließt, wie in Fig. 5B gezeigt ist.

[0041] Es gibt eine Begrenzung bezüglich des Betrags an visuell akzeptierbarer Rotation der stereoskopischen Bilderfassungseinrichtungen **19**, **35** und der Erhöhung der Bilderfassungseinrichtungen **19**, **35** relativ zu der Ebene der Manipulatoren **32**, **34**. Die Erhöhung kann nicht so groß sein, dass sie es unmöglich macht, den relativen Betrachtungswinkel jedes der beiden Manipulatoren relativ zueinander zu ändern. Im Klartext heißt dies, wenn der Winkel Φ gleich 90° Erhöhung ist (wobei die Betrachtungsachse **54** in der Bezugsebene liegt, die von den Linien **52** und **53** gebildet wird), wird keine nutzbringende Änderung indem relativen Betrachtungswinkel erreicht werden, indem das Bild gedreht wird. Bei anderen Erhöhungswinkeln hängt die Begrenzung von dem Separationswinkel der Manipulatoren **32**, **34** und zweitens von dem Abstand der stereoskopischen Linsen **28**, **36** ab.

[0042] Zusätzlich zu dem Erzielen einer statischen Neuausrichtung der Manipulatorpositionen durch die Rotation der Kameralinse **28** kann das System eine dynamische Neuausrichtung bewirken, indem sie eine Koordinatentransformation mittels Verschiebeeinrichtungen **25** durchführt. Die tatsächliche Position der Manipulatorenden in dem Arbeitsraum **30** kann in eine sichtbare Position in dem angezeigten Bild umgewandelt werden, so dass die Manipulatoren so erscheinen, als ob sie sich fest mit den Handsteuerungen des Operators verbunden bewegen. Das Ändern der virtuellen Position der Manipulatorenden verbessert die Geschicklichkeit des Operators bei der Handhabung des Objekts in dem Arbeitsraum **30**.

[0043] Fig. 8 und Fig. 9 veranschaulichen jeweils das Bild 132 eines Manipulators (**32**) und eines tatsächlichen Manipulators **32** relativ zu der Handsteuerung **24**. In diesem Beispiel und bei einem Vergleich mit Fig. 2 sind die Manipulatoren und die entsprechenden Controller, die von den Handsteuerungen repräsentiert werden, von einem Typ, der einen einzigen Drehpunkt **151**, **161** in Verbindung mit den Positionssensoren **51**, **61** mit einer zweidimensionalen Schwenkung um den/die Punkt(e) und eine Verlängerung entlang der Achse des Manipulators **32** verwendet. Andere Bewegungen, die mit diesen Betätigungen konsistent sind, wie etwa eine Längsrotation des Manipulators um seine Achse, werden von der Erfindung in Betracht gezogen. Unter Bezugnahme auf Fig. 8 und Fig. 9 bewirkt die Bewegung der Handsteuerung **24**, dass sich das Manipulatorende **72**

zu einem neuen Punkt (a, b, c) in dem Arbeitsraum **30** derart bewegt, dass sich das Bild 132 des Manipulatorendes **172** zu einem neuen Punkt (p, q, r) in dem virtuellen Arbeitsraum **22** bewegt, wobei dieser Punkt bei der Betrachtung durch den Operator so erscheint, als ob er sich an dem verlängerten Ende der Handsteuerung **24** befindet. Es mag vorzuziehen sein, die Servobefehle, die sich auf die Handsteuerung und ihren entsprechenden Manipulator beziehen, in ihren Polarkoordinatensystemen (Ω, ψ, L) und (Ω', ψ', L') auszudrücken. Diese Polarkoordinaten und ihre jeweiligen Punkte in Kartesischen Koordinatensystemen werden durch bekannte Transformationen von Polarkoordinaten in Kartesische Koordinaten miteinander in Bezug gebracht.

[0044] Unter erneuter Bezugnahme auf Fig. 3 werden die spezifischen Rotationswinkel, die bei der Berechnung der Koordinatentransformation verwendet werden, gezeigt. Der Winkel Φ **56** bezeichnet den Neigungswinkel der Sehachse **54** der Kameralinse **28** unter der vertikalen Achse U. Der Winkel θ **58** bezeichnet die Rotation der Kameralinse **28** in der horizontalen Ebene weg von der Mittellinienachse **52** relativ zu dem Mittelpunkt **50** in dem Arbeitsraum **30**. Der Winkel r **60** bezeichnet die Rotation der Kameralinse um ihre Sehachse **54**.

[0045] Während des Betriebs eines monoskopischen Telemanipulationssystems werden die Kameralinse **28** und die Bilderfassungseinrichtung **19** um eine visuelle Achse **54** gedreht, wie oben beschrieben worden ist. Die Koordinaten (a, b, c) in einem orthogonalen Kartesischen Bezugskoordinatensystem des dreidimensionalen Arbeitsraums **30** definieren die tatsächliche Position des Endes eines Manipulators, wie z.B. des linken Manipulators **32**. Die nachfolgende Matrizengleichung bringt die gewünschte virtuelle Position (p, q, r im orthogonalen Kartesischen Raum) des Manipulatorendes in dem angezeigten Bild in der Videoanzeige **20** mit der tatsächlichen Position (a, b, c) des Manipulatorendes in dem Arbeitsraum **30** in Bezug:

$$\begin{vmatrix} p \\ q \\ r \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos I' & \sin I' & 0 \\ -\sin I' & \cos I' & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \cos\Phi & 0 & \sin\Phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\Phi & 0 & \cos\Phi \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} a \\ b \\ c \end{vmatrix}$$

(Gleichung 2)

[0046] Wenn das Manipulatorende an einer Position (p, q, r) in dem angezeigten Bild in der Videoanzeige **20** angezeigt wird, wird es dem Operator so erscheinen, also ob sich der Manipulator tatsächlich an dem Ende der starren Handsteuerungsvorrichtung des Operators befindet. Die Koordinatentransformation verbessert die Mühelosigkeit, mit der der Operator Objekte in dem Arbeitsraum unter Verwendung eines Telemanipulationssystems handhaben kann.

[0047] In dem Fall einer stereoskopischen Bildgebung wird die Stereobilderfassungseinrichtung **19**, **35** relativ zu einer Bezugsachse **59** parallel zu einer Achse in der Ebene gedreht, die von den Manipulatoren **32**, **34** gebildet wird, mit einem Schnittpunkt an dem Mittelpunkt **50**, wobei die Achse senkrecht zu einer Linie verläuft, die die Manipulatoren halbiert und durch den Mittelpunkt **50** verläuft, wie in Fig. 5B gezeigt ist. Der Winkel r **60** misst den Betrag an Rotation der stereoskopischen Linsen **28**, **36**, und sein Wert kann in der Gleichung 2 zur Berechnung der korrekten Koordinatentransformation für die stereoskopische Betrachtung verwendet werden.

[0048] Um zu gewährleisten, dass die Bewegungen der Manipulatoren **32**, **24** in dem Arbeitsraum **30** den Bewegungen der Handsteuerungen **24**, **26** in dem virtuellen Arbeitsraum **22** des Operators richtig folgen, und das sogar ohne komplette Kenntnis aller Winkel und Positionen, kann der Operator eine Kalibrierungsreferenz für Manipulatoren **32**, **34**, wenn sie in dem angezeigten Bild in der Videoanzeige **20** betrachtet werden, in Verbindung mit dem Positionsverfolgungsservo einrichten. Unter Bezugnahme auf Fig. 6A, die das Bild zeigt, das in einer Videoanzeige **20** angezeigt wird, kann zum Beispiel ein Vierpunkte-Koordinaten-Grafikelement **62** in der Form einer Tetraeder- oder Würfelstruktur in einer dreidimensionalen Ansicht in dem dreidimensionalen Raum auf der Stereobildanzeige eingeblendet werden, was einen Koordinatenbezug in dem dreidimensionalen Bildraum bereitstellt. Zur Kalibrierung der Position eines einzelnen Manipulators im Hinblick auf seine entsprechende Handsteuerung "öffnet" das System den Regelkreis, und der Operator **14** bewegt zum Beispiel die Handsteuerung **24**, während er die Bewegung des Endes des Manipulators **32** beobachtet und das Ende lenkt, bis es so aussieht, als ob dieses einen ersten Bezugspunkt **64** des eingeblendeten Grafikelements **62** berührt, wie in Fig. 6B gezeigt ist. (Da die Bewegung der Handsteuerung und des Manipulatorendes noch nicht koordiniert worden sind, kann die Ausrichtung des Endes auf den ersten Bezugspunkt eine sehr behutsame Bemühung erfordern.) Der Operator **14** zeigt dann dem System an, dass die Überlagerung des Manipulators und des Bezugspunkts erreicht worden ist (z.B. wird ein "Eingestellt"-Signal an das System gesendet).

[0049] Das System verriegelt dann den Manipulator **32** in der Position, öffnet den Regelkreis, indem sie diesen von der Handsteuerung **24** abkoppelt, und instruiert den Operator **14**, die Handsteuerung **24** freizugeben. Das System stellt die Verlängerung L (Fig. 8 und Fig. 9) der Handsteuerung so ein, dass sie mit der des Manipulators L' übereinstimmt, indem sie den Offset σ_3 = L-L' einfügt, damit dann, wenn der Regelkreis geschlossen wird, keine reaktive Bewegung durch eine der Vorrichtungen erfolgt. Das heißt, die virtuellen Verlängerungspositionen der Handsteuerung **24** und des Manipulators **32** müssen identisch sein, wenn sie in dem Regelkreis verglichen werden. Das System schließt dann den Regelkreis und entriegelt den Manipulator **32** und gibt die Steuerung an den Operator **14** zurück.

[0050] Der Operator bewegt dann die Handsteuerung um ihren Drehpunkt zu einer Winkelausrichtung (ψ, Ω), bei der der Operator das Gefühl hat, dass das Bild des Manipulators aus der Handsteuerung des Operators herauszukommen scheint. In ähnlicher Weise zu dem oben beschriebenen Prozess berechnet das System die Transformationen, die es gewährleisten, dass es keine reaktive Bewegung durch entweder den Master oder den Slave geben wird, wenn der Regelkreis geschlossen wird. Das System berechnet die Winkel-Offsets σ_1 = ψ-ψ' und σ_2 = Ω-Ω' und das Transformieren der virtuellen Position des Master oder des Slave vor dem Schließen des Regelkreises. Das System speichert nun die Positionen in dem dreidimensionalen Raum des Handsteuerungs-Master (ψ_1, Ω_1, L_1) und des Manipulator-Slave (ψ'_1, Ω'_1, L'_1).

[0051] Der Operator wiederholt die Elemente dieses Prozesses mit den restlichen Bezugspunkten des eingeblendeten Grafikelements **62**. Das System kann dann die nachfolgende linearisierte Gleichung ableiten und installieren, die inkrementelle Änderungen in der Position der Handsteuerungs-Masters **24**, **26** in Bezug zu inkrementellen Änderungen in der Position der Manipulator-Slaves **32**, **34** bringt, und zwar unter Verwendung der Datensätze zur Bestimmung der Koeffizienten der Gleichungen, die die Positionen in Beziehung zueinander bringen:

$$\Delta\Omega' = k_{11}\Delta\Omega + k_{12}\Delta\psi + k_{13}\Delta L$$

$$\Delta\psi' = k_{21}\Delta\Omega + k_{22}\Delta\psi + k_{23}\Delta L$$

$$\Delta L' = k_{31}\Delta\Omega + k_{32}\Delta\psi + k_{33}\Delta L$$

[0052] Die Lösung zu der obigen linearisierten Gleichung ist wie folgt:

$$\begin{vmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \Delta\Omega'_1 & \Delta\Omega'_2 & \Delta\Omega'_3 \\ \Delta\Psi'_1 & \Delta\Psi'_2 & \Delta\Psi'_3 \\ \Delta L'_1 & \Delta L'_2 & \Delta L'_3 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \Delta\Omega_1 & \Delta\Omega_2 & \Delta\Omega_3 \\ \Delta\Psi_1 & \Delta\Psi_2 & \Delta\Psi_3 \\ \Delta L_1 & \Delta L_2 & \Delta L_3 \end{vmatrix}^{-1}$$

(Gleichung 3)

[0053] Das System installiert diese Koeffizientenwerte in dem Koordinatentransformator **43**, der den Servo **45** steuert, mit geeigneten Offsets $\sigma_1\sigma_2$ und σ_3, so dass es keine reaktive Bewegung gibt, wenn der Regelkreis geschlossen wird.

[0054] In einem alternativen Ausführungsbeispiel wird die Kalibrierung der Manipulatoren durch eine virtuelle Bewegung mit Hilfe des Systems erreicht. Unter Bezugnahme auf Fig. 6B bewegt das System das Manipulatorende **32**, anstatt dass der Operator das Manipulatorende **32** führt, zu einem von vier definierten Punkten in dem dreidimensionalen Arbeitsraum **30**, wie etwa dem Bezugspunkt **64**, wie er von dem Operator aus gesehen wird. Unter Verwendung der Handsteuerung **24** kalibriert der Operator **14** dann dynamisch die Position des Manipulators **32**, indem er einen eingeblendeten Grafikpunkt lenkt, bis dieser auf dem Manipulatorende **32** überlagert erscheint. Der Operator **14** zeigt dann dem System an, dass eine Überlagerung des Manipulatorendes **32** und des Bezugspunkts **64** erreicht worden ist, und die Koordinaten des Manipulators **32** und der Handsteuerung **24** werden aufgezeichnet. Der Prozess wird für die restlichen Bezugspunkte wiederholt, nach dem das System eine Koordinatentransformationsformel in dem Koordinatentransformator **43** ableitet und installiert, wie dies in dem obigen Ausführungsbeispiel beschrieben worden ist.

[0055] In der tatsächlichen Praxis ist es vorzuziehen, dass eher der Chirurg als das System den Kalibrierungsprozess initiiert, wenn die Erfindung bei einer laparoskopischen Operation verwendet wird. Während der Operation wird der Kalibrierungsprozess innerhalb eines Abdomens eines Patienten ausgeführt, wo es wenig Platz zum Manövrieren gibt. Folglich können automatische Bewegungen des Manipulators, egal wie klein, als

weniger wünschenswert betrachtet werden wie operatorgesteuerte Bewegungen.

[0056] Ein anderes Verfahren zum Hervorrufen eines Gefühls der Telepräsenz in einem Telemanipulationssystem beinhaltet die Verwendung einer spezifischen Koordinatentransformation, um andere Änderungen in dem angezeigten Bild zu kompensieren, wie etwa eine seitliche Verschiebung oder eine Maßstabsänderung. Die Kamera kann eine seitliche oder winkelmäßige Verlagerung erfahren, die bewirkt, dass das angezeigte Bild verschoben wird. Außerdem kann die Kamera in der Lage sein, das Objekt in dem Arbeitsraum zu vergrößern, was eine Maßstabsänderung und eine Verschiebung des virtuellen Drehpunkts des Manipulators bewirkt.

[0057] Die Fig. 7A und Fig. 7B zeigen die kombinierte Wirkung einer seitlichen Verschiebung des Bildes und einer Maßstabsänderung, die durch eine Vergrößerung des Bildes herbeigeführt worden sind. Fig. 7A zeigt einen Teil des angezeigten Bildes, einschließlich eines Manipulators **32**, in einem zweidimensionalen Feld. Der Mittelpunkt des Bildes befindet sich bei den Koordinaten (0, 0). Der Operator erfährt das bestmögliche Gefühl der Telepräsenz, wenn sich das Manipulatorende **72** an den Koordinaten (u, v) in dem Bildfeld so zu bewegen scheint, als ob es fest an der Steuervorrichtung in der Hand des Operators angebracht wäre. Die Steuervorrichtung wird an dem Punkt (m, n) in der Figur geschwenkt. Der Manipulator befindet sich in einem Winkel α **74** zu der y-Achse, und der Abstand von dem Drehpunkt (m, n) zu dem Manipulatorende (u, v) ist die Länge L **76**.

[0058] Fig. 7B zeigt, was der Operator sehen würde, wenn das Bild um einen Faktor m vergrößert worden wäre. Der Mittelpunkt des Bildes ist seitlich um einen Abstand von Δx und Δy verschoben, und die neuen virtuellen Koordinaten des Manipulatorendes **72** sind (u', v'). Um ein gewünschtes Niveau an Telepräsenz zu gewährleisten, werden der Winkel α **74** und die Länge L **76** durch perspektivische Korrektureinrichtungen **29** in dem angezeigten Bild neu abgebildet bzw. zugeordnet (Remapping), um dem Operator den Eindruck zu vermitteln, dass das Manipulatorende **72** immer noch fest an der Handsteuerungsvorrichtung angebracht ist. Das nachfolgende Paar an Gleichungen beschreibt das Remapping des Winkels α **74** in den Winkel α **78** und der Länge L **76** in die Länge L' **80**:

$$\alpha' = \arctan[(u' - m)/(v' - n)] \text{ und}$$

$$L = [(u' - m)^2 + (v' - n)^2]^{1/2}$$

wobei:

$u' = M(u - \Delta x)$ $\quad v' = M(v - \Delta y)$ und wobei

$u = L(\sin\alpha) + m$ $\quad v = L(\cos\alpha) + n$

[0059] Wenn, α und L gemäß den obigen Gleichungen neu abgebildet bzw. zugeordnet werden, wird der Anschein erweckt, als ob sich das Manipulatorende **72** in dem angezeigten Bild so bewegen würde, wie wenn es fest mit der Handsteuerungsvorrichtung des Operators verbunden wäre.

[0060] Die obigen Beziehungen können erweitert werden, um Transformationen in drei Dimensionen einzuschließen, um eine Verlagerung der Manipulatoren zu kompensieren, wenn die Kameralinse **28** um ihre eigene Sehachse **54** gedreht wird, wie bei dem Ausführungsbeispiel, das im Hinblick auf Fig. 3 beschrieben worden ist. In allen Fällen wird das Ziel des Aufrecherhaltens der Übereinstimmung der wahrgenommenen Ebene, die die beiden Manipulatoren enthält, mit der Ebene der beiden Handsteuerungen erreicht.

[0061] Die Erfindung ist nun unter Bezugnahme auf spezifische Ausführungsbeispiele beschrieben worden. Andere Ausführungsbeispiele werden den Durchschnittsfachleuten auf dem Gebiet bei Bezugnahme auf die vorliegende Beschreibung offensichtlich werden. Zum Beispiel kann die Erfindung auf Gelenkmanipulatoren mit mehreren Dreh- und Verschiebungspunkten oder mit Drehpunkten an Stellen, die physisch nicht an den Manipulatoren angebracht sind, erweitert werden. Es ist deshalb nicht so gedacht, dass die Erfindung auf irgendeine Weise begrenzt wird, mit Ausnahme durch das, was von den angehängten Ansprüchen angegeben wird.

Patentansprüche

1. Telemanipulationssystem (**10**) zum Manipulieren von Objekten, die sich in einem tatsächlichen Arbeits-

raum (**30**) an einem fernen Arbeitsplatz (**16**) befinden, durch einen Steueroperator (**14**) von einer Steueroperatorstation (**12**) aus, wobei das Telemanipulationssystem (**10**) einen Manipulator (**32**, **34**) an dem Arbeitsplatz mit einem Endeffektor (**39**, **41**) zur Manipulation eines Objekts in dem tatsächlichen Arbeitsraum, einen Controller, der eine Handsteuerung (**24**, **26**) einschließt, an der Steueroperatorstation (**12**) zur Fernsteuerung des Manipulators durch den Steueroperator (**14**), eine Bilderfassungsvorrichtung (**19**) zur Aufnahme eines Echtzeitbildes des tatsächlichen Arbeitsraumes (**30**) und einen Bildgenerator (**31**) zum Erzeugen einer Anzeige auf einem Monitor für die Augen des Steueroperators umfasst, wobei der Controller des Weiteren Folgendes umfasst:
Einrichtungen (**23**), die mit der Bilderfassungsvorrichtung (**19**) gekoppelt sind, zum Verarbeiten des Echtzeitbildes in ein verarbeitetes Bild, das dem Steueroperator angezeigt wird, wobei sich die Bilderfassungsvorrichtung in einem Winkel und einer Position relativ zu dem Endeffektor (**39**, **41**) befindet, die sich von einer relativen Position der Augen des Steueroperators (**14**) und der Handsteuerung (**24**, **26**) unterscheidet, wobei die Bildverarbeitungseinrichtung (**23**) und der Bildgenerator zusammenarbeiten, um das verarbeitete Bild des Endeffektors zu erzeugen, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Anzeige so positioniert ist, dass sich das verarbeitete Bild im Wesentlichen in einer Position befindet, in der der Operator die Handsteuerung sehen würde, wodurch ein virtueller Arbeitsraum (**22**) geschaffen wird, und dass das verarbeitete Bild im Wesentlichen das gleiche wie ein Bild ist, das von einer Bilderfassungsvorrichtung aufgenommen wird, die sich in einem Winkel und einer Position relativ zu dem Endeffektor befindet, die im Wesentlichen äquivalent zu einem relativen Winkel und einer relativen Position der Augen des Steueroperators und des Controllers sind.

2. System nach Anspruch 1, wobei die Bildverarbeitungseinrichtung (**23**) des Weiteren Folgendes umfasst:
Einrichtungen zum Umwandeln einer tatsächlichen Position des Endeffektors in dem Arbeitsraum in eine wahrgenommene Position des Endeffektors in dem verarbeiteten Bild, wobei die Bilderfassungsvorrichtung (**19**) monoskopisch ist und in einem Winkel in einer Bezugsebene positioniert ist, wobei sich die Bilderfassungsvorrichtung (**19**) oberhalb der Bezugsebene in einem Bezugsraum befindet, und wobei die Augen des Steueroperators (**14**) in einem Winkel von 0° relativ zu einer Grundlinie in der Bezugsebene positioniert sind, wobei sich die Augen oberhalb der Bezugsebene in dem Bezugsraum befinden, wobei das verarbeitete Bild Pixel um Pixel um einen Winkel θ' gedreht wird, der etwa gleich -θ ist.

3. System nach Anspruch 2, wobei die Koordinaten der wahrgenommenen Position des Endeffektors (**39**, **41**) mit den Koordinaten der tatsächlichen Position des Endeffektors durch die folgende Beziehung dynamisch in Bezug stehen:

$$\begin{vmatrix} p \\ q \\ r \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos\theta' & \sin\theta' & 0 \\ -\sin\theta' & \cos\theta' & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \cos\Phi & 0 & \sin\Phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\Phi & 0 & \cos\Phi \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} a \\ b \\ c \end{vmatrix}$$

wobei
[p, q, r] die Koordinaten der wahrgenommenen Position sind,
[a, b, c] die Koordinaten der tatsächlichen Position sind,
der Winkel die Rotation der Bilderfassungseinrichtung in einer horizontalen Ebene um eine vertikale Achse ist,
der Winkel θ' im Wesentlichen gleich – θ ist, und
der Winkel Φ der Winkel der Neigung unter der vertikalen Achse einer Achse ist, die senkrecht zu einer Oberfläche der Bilderfassungseinrichtung ist.

4. System nach Anspruch 1, wobei die Bildverarbeitungseinrichtung (**23**) des Weiteren Folgendes umfasst:
Einrichtungen zur statischen Neuausrichtung des Manipulators (**32**, **34**), die durch das Drehen der Bilderfassungsvorrichtung (**19**) um eine Achse senkrecht zu einer Oberfläche der Bilderfassungsvorrichtung in eine Position bewirkt wird, in der der Manipulator in dem verarbeiteten Bild als dem Steueroperator (**14**) präsentiert erscheint, wobei sich die Handsteuerungen (**24**, **26**) unterhalb eines Blickpunkts des Steueroperators (**14**) befinden.

5. System nach Anspruch 1, wobei die Bildverarbeitungseinrichtung (**23**) des Weiteren Folgendes umfasst:
Einrichtungen zur statischen Neuausrichtung des Manipulators, die durch das Drehen der Bilderfassungsvorrichtung (**19**) um eine Achse senkrecht zu einer Oberfläche der Bilderfassungsvorrichtung in eine Position bewirkt wird, in der der Manipulator (**32**, **34**) in dem verarbeiteten Bild als dem Steueroperator (**14**) präsentiert erscheint, wobei sich die Handsteuerungen (**24**, **26**) oberhalb eines Blickpunkts des Steueroperators (**14**) befinden.

6. System nach Anspruch 4, wobei die Bilderfassungsvorrichtung (**19**) Folgendes umfasst:

eine monoskopische Kamera (**19**), wobei die Rotation der Bilderfassungseinrichtung um eine Sehachse der monoskopischen Kamera durch einen Mittelpunkt einer Linse (**28**) der monoskopischen Kamera erfolgt.

7. System nach Anspruch 4, wobei die Bilderfassungsvorrichtung (**19**) Folgendes umfasst:
eine stereoskopische Doppelblendenkamera mit einer senkrechten Achse, die eine Linie zwischen jeder Blende der stereoskopischen Kamera halbiert, wobei die Rotation der Bilderfassungsvorrichtung um eine Sehachse der stereoskopischen Kamera durch den Mittelpunkt der senkrechten Achse erfolgt.

8. System nach Anspruch 4, wobei die Bildverarbeitungseinrichtung (**23**) des Weiteren Folgendes umfasst:
Einrichtungen zur Übertragung einer tatsächlichen Position des Endeffektors in dem Arbeitsraum in eine wahrgenommene Position des Endeffektors in dem verarbeiteten Bild derart, dass die Bewegung des Endeffektors (**39**, **41**) starr verbunden mit der Handsteuerung (**24**, **26**) erscheint.

9. System nach Anspruch 8, wobei das Übertragen der tatsächlichen Position in die wahrgenommene Position gemäß der folgenden Beziehung erfolgt:

$$\begin{vmatrix} p \\ q \\ r \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos I' & \sin I' & 0 \\ -\sin I' & \cos I' & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \cos\Phi & 0 & \sin\Phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\Phi & 0 & \cos\Phi \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} a \\ b \\ c \end{vmatrix}$$

wobei
[p, q, r] die Koordinaten der wahrgenommenen Position sind,
[a, b, c] die Koordinaten der tatsächlichen Position sind,
der Winkel Γ die Rotation der Bilderfassungseinrichtung um eine Achse senkrecht zu einer Oberfläche der Bilderfassungseinrichtung ist,
der Winkel Φ der Winkel der Neigung der senkrechten Achse unter einer vertikalen Achse ist, und
der Winkel θ die Rotation der Bilderfassungseinrichtung in einer horizontalen Ebene um die vertikale Achse ist.

10. System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei sich ein Winkel und eine Position der Bilderfassungsvorrichtung (**19**) relativ zu dem Endeffektor (**39**, **41**) im Maßstab und in der seitlichen Position im Vergleich zu dem Steueroperator und der Handsteuerung unterscheiden, und wobei die Bildverarbeitungseinrichtung (**23**) die Manipulation des Endeffektors (**39**, **41**) mit der Handsteuerung (**24**, **26**) korreliert, wobei die Bildverarbeitungseinrichtung (**23**) und der Bildgenerator (**31**) zusammen des Weiteren Folgendes umfassen:
Einrichtungen (**29**) zum Durchführen einer perspektivischen Korrektur in dem verarbeiteten Bild im Anschluss an eine seitliche Verschiebung und eine Maßstabsänderung der Bilderfassungsvorrichtung (**19**).

11. System nach Anspruch 10, wobei die Einrichtung (**29**) zur perspektivischen Korrektur Einrichtungen zur Durchführung von Transformationen gemäß den nachfolgenden Beziehungen umfasst:

$\alpha' = \arctan[(x - m)/(y' - n)]$,

$L' = [(x' - m)^2 + (y' - n)^2]1/2$,

$x' = M(x - \Delta x)$,

$y' = M(y - \Delta y)$,

$x = L(\sin\alpha) + m$,

$y = L(\cos\alpha) + n$

wobei
die Koordinaten (m, n) eine Position eines Drehpunkts des Manipulators vor dem Stattfinden der seitlichen Verschiebung und der Maßstabsänderung beschreiben,
die Koordinaten (m', n') eine Position des Drehpunkts des Manipulators nach dem Stattfinden der seitlichen Verschiebung und der Maßstabsänderung beschreiben,
die Koordinaten (x, y) eine Position des Endeffektors vor dem Stattfinden der seitlichen Verschiebung und der Maßstabsänderung beschreiben,
die Koordinaten (x', y') eine Position des Endeffektors nach dem Stattfinden der seitlichen Verschiebung und

der Maßstabsänderung beschreiben,
die Koordinaten (Δx, Δy) die Positionsänderung des Endeffektors beschreiben, die durch die seitliche Verschiebung verursacht worden ist,
der Faktor M den Vergrößerungsfaktor der Maßstabsänderung beschreibt,
der Winkel α die Rotation des Manipulators um eine vertikale Achse vor dem Stattfinden der seitlichen Verschiebung und der Maßstabsänderung ist,
der Winkel α' die Rotation des Manipulators um die vertikale Achse nach dem Stattfinden der seitlichen Verschiebung und der Maßstabsänderung ist,
die Länge L ein Abstand zwischen dem Drehpunkt und dem Endeffektor vor dem Stattfinden der seitlichen Verschiebung und der Maßstabsänderung ist, und
die Länge L' ein Abstand zwischen dem Drehpunkt und dem Endeffektor nach dem Stattfinden der seitlichen Verschiebung und der Maßstabsänderung ist.

12. System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Bildverarbeitungseinrichtung (**23**) eine Bildverarbeitungsvorrichtung (**23**) einschließt, die mit dem Bildgenerator (**31**) gekoppelt ist, wobei die Bildverarbeitungsvorrichtung das Echtzeitbild in das verarbeitete Bild verarbeitet.

13. System nach Anspruch 12, wobei die Bildverarbeitungsvorrichtung (**23**) des Weiteren Einrichtungen zur Transformierung der Koordinaten der Bilderfassungsvorrichtung in Koordinaten nahe den Endeffektoren derart umfasst, dass das verarbeitete Bild dem Operator ein Gefühl bereitstellt, dass der Controller im Wesentlichen integral mit den Endeffektoren ist.

14. System nach Anspruch 12, das des Weiteren Folgendes umfasst:
eine Servosteuerung zur Steuerung der Position des Manipulators;
einen ersten Positionssensor (**59**, **61**), der angeordnet ist, um eine Position der Manipulation (**32**, **34**) in dem Arbeitsraum zu erfassen;
einen zweiten Positionssensor (**51**, **55**), der angeordnet ist, um eine Position der Handsteuerung (**24**, **26**) an der Operatorstation zu erfassen; und
eine Koordinatentransformationsvorrichtung, die mit der Bildverarbeitungseinrichtung (**23**), dem ersten Positionssensor und dem zweiten Positionssensor gekoppelt ist, um Informationen über die Manipulatorposition, die Handsteuerungsposition und die Position des verarbeiteten Bildes in Steuersignale umzuwandeln, die an die Servosteuerung angelegt werden.

15. System nach Anspruch 14, des Weiteren mit einem dritten Positionssensor (**21**), der angeordnet ist, um eine Position der Bilderfassungsvorrichtung (**19**) zu erfassen, wobei die Koordinatentransformationsvorrichtung mit dem dritten Positionssensor gekoppelt ist, um Positionsinformationen über die Bilderfassungsvorrichtung (**19**) in Steuersignale umzuwandeln.

16. System nach einem der vorhergehenden Ansprüche und das dynamische Kalibrierungseinrichtungen (**27**) einschließt, die Folgendes umfassen:
Einrichtungen zum automatischen Bewirken, dass sich der Endeffektor (**39**, **41**) durch eine vorher ausgewählte Sequenz von Bezugspunkten bewegt, die in einem dreidimensionalen Raum in dem verarbeiteten Bild verteilt sind;
Einrichtungen zum Anzeigen eines überdeckten Grafikpunktes in der Anzeige des Endeffektors derart, dass die Position des Punktes durch die Position der Handsteuerung (**24**, **26**) gesteuert wird;
manuell betätigbare Einrichtungen zum Registrieren, wann der Punkt auf dem Endeffektor an jedem Bezugspunkt überlagert wird; und
Einrichtungen zum Herstellen einer Nachführungsbeziehung zwischen der Handsteuerung und dem Endeffektor, um dadurch eine Kalibrierung herzustellen.

17. System nach einem der Ansprüche 1 bis 15, das dynamische Kalibrierungseinrichtungen (**27**) einschließt, die Folgendes umfassen:
Einrichtungen zum Anzeigen einer Darstellung eines Vierpunkte-Koordinaten-Grafikelements in einem dreidimensionalen Raum in dem Echtzeitbild des Endeffektors (**39**, **41**);
manuelle Eingabeeinrichtungen zum Registrieren, wann der Endeffektor, der durch die Steuerung der Handsteuerung (**24**, **26**) bewegbar ist, so positioniert ist, dass er jeden Bezugspunkt des Grafikelements zu berühren scheint; und
Einrichtungen zum Herstellen einer Nachführungsbeziehung zwischen der Handsteuerung und dem Endeffektor.

18. System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Bilderfassungsvorrichtung ein Endoskop umfasst.

19. System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei der Endeffektor ein chirurgisches instrument umfasst.

20. System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, das dynamische Neuausrichtungseinrichtungen zum dynamischen Neuausrichten der Manipulatoren einschließt, indem eine Koordinatentransformation durch Transformationseinrichtungen durchgeführt wird.

21. Verfahren zum Manipulieren von Objekten, die sich in einem tatsächlichen Arbeitsraum (**30**) an einem fernen Arbeitsplatz (**16**) befinden, durch einen Steueroperator (**14**) von einer Steuerstation (**12**) aus, wobei das Verfahren Folgendes umfasst:
Verwenden einer Handsteuerung (**24**, **26**) an der Steueroperatorstation (**12**) zur Fernsteuerung eines Manipulators (**32**, **34**) mit einem Endeffektor (**39**, **41**) an dem Arbeitsplatz;
Aufnehmen eines Echtzeitbildes des tatsächlichen Arbeitsraumes (**30**) unter Verwendung einer Bilderfassungsvorrichtung (**19**) an einer Position relativ zu dem Endeffektor (**38**, **41**), die sich von einer relativen Position der Augen des Steueroperators (**14**) und der Handsteuerung (**24**, **26**) unterscheidet;
Verarbeiten des Echtzeitbildes in ein verarbeitetes Bild, das dem Steueroperator (**14**) angezeigt wird, wobei das verarbeitete Bild im Wesentlichen das gleiche wie ein Bild ist, das von einer Bilderfassungsvorrichtung aufgenommen wird, die sich in einem Winkel und einer Position relativ zu dem Endeffektor (**39**, **41**) befindet, die im Wesentlichen äquivalent zu einem relativen Winkel und einer relativen Position der Augen des Steueroperators (**14**) und des Controllers sind; und
Anzeigen des verarbeiteten Bildes für den Steueroperator (**14**) in einer Position, die sich im Wesentlichen in einer Position befindet, in der der Operator die Handsteuerung sehen würde, wodurch ein virtueller Arbeitsraum (**22**) geschaffen wird.

22. Verfahren nach Anspruch 21, das das Umwandeln einer tatsächlichen Position des Endeffektors (**39**, **41**) in dem Arbeitsraum in eine wahrgenommene Position des Endeffektors in dem verarbeiteten Bild umfasst, wobei das verarbeitete Bild aus einer Position in einem Winkel in einer Bezugsebene aufgenommen wird und oberhalb der Bezugsebene in einem Bezugsraum positioniert wird, und wobei die Augen des Steueroperators (**14**) in einem Winkel von 0° relativ zu einer Grundlinie in der Bezugsebene positioniert sind, wobei sich die Augen oberhalb der Bezugsebene in dem Bezugsraum befinden, wobei das verarbeitete Bild Pixel um Pixel um einen Winkel θ' gedreht wird, welcher etwa gleich -θ ist.

23. Verfahren nach Anspruch 22, wobei die Koordinaten der wahrgenommenen Position des Endeffektors (**39**, **41**) zu den Koordinaten der tatsächlichen Position des Endeffektors durch die folgende Beziehung dynamisch in Bezug stehen:

$$\begin{vmatrix} p \\ q \\ r \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos\theta' & \sin\theta' & 0 \\ -\sin\theta' & \cos\theta' & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \cos\Phi & 0 & \sin\Phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\Phi & 0 & \cos\Phi \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} a \\ b \\ c \end{vmatrix}$$

wobei
[p, q, r] die Koordinaten der wahrgenommenen Position sind,
[a, b, c] die Koordinaten der tatsächlichen Position sind,
der Winkel die Rotation der Bilderfassungseinrichtung in einer horizontalen Ebene um eine vertikale Achse ist,
der Winkel θ' im Wesentlichen gleich -θ ist, und
der Winkel Φ der Winkel der Neigung unter der vertikalen Achse einer Achse ist, die senkrecht zu einer Oberfläche der Bilderfassungseinrichtung ist.

24. Verfahren nach einem der Ansprüche 21 bis 23, wobei der Schritt des Verarbeitens des Bildes das statische Neuausrichten des Manipulators (**32**, **34**) durch das Drehen einer Bilderfassungsvorrichtung (**19**), die zum Aufnehmen des Echtzeitbildes verwendet wird, um eine Achse senkrecht zu einer Oberfläche der Bilderfassungsvorrichtung (**19**) in eine Position umfasst, in der der Manipulator (**32**, **34**) in dem verarbeiteten Bild als dem Steueroperator (**14**) präsentiert erscheint, wobei sich die Handsteuerungen (**24**, **26**) unterhalb eines Blickpunkts des Steueroperators befinden.

25. Verfahren nach einem der Ansprüche 21 bis 23, wobei der Schritt des Verarbeitens des Bildes das statische Neuausrichten des Manipulators (**32**, **34**) durch das Drehen einer Bilderfassungsvorrichtung (**19**), die

zum Aufnehmen des Echtzeitbildes verwendet wird, um eine Achse senkrecht zu einer Oberfläche der Bilderfassungsvorrichtung (**19**) in eine Position umfasst, in der der Manipulator (**32**, **34**) in dem verarbeiteten Bild als dem Steueroperator (**14**) präsentiert erscheint, wobei sich die Handsteuerungen (**24**, **26**) oberhalb eines Blickpunkts des Steueroperators befinden.

26. Verfahren nach einem der Ansprüche 21 bis 25, wobei der Schritt des Aufnehmens des Echtzeitbildes das Übertragen einer tatsächlichen Position des Endeffektors (**39**, **41**) in dem Arbeitsraum in eine wahrgenommene Position des Endeffektors in dem verarbeiteten Bild derart umfasst, dass die Bewegung des Endeffektors starr verbunden mit der Handsteuerung (**24**, **26**) erscheint.

27. Verfahren nach Anspruch 26, wobei das Übertragen der tatsächlichen Position in die wahrgenommene Position gemäß der folgenden Beziehung erfolgt:

$$\begin{vmatrix} p \\ q \\ r \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos\Gamma' & \sin\Gamma' & 0 \\ -\sin\Gamma' & \cos\Gamma' & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \cos\Phi & 0 & \sin\Phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\Phi & 0 & \cos\Phi \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} a \\ b \\ c \end{vmatrix}$$

wobei
[p, q, r] die Koordinaten der wahrgenommenen Position sind,
[a, b, c] die Koordinaten der tatsächlichen Position sind,
der Winkel Γ die Rotation der Bilderfassungseinrichtung um eine Achse senkrecht zu einer Oberfläche der Bilderfassungseinrichtung ist,
der Winkel der Winkel der Neigung der senkrechten Achse unter einer vertikalen Achse ist, und
der Winkel die Rotation der Bilderfassungseinrichtung in einer horizontalen Ebene um die vertikale Achse ist.

28. Verfahren nach einem der Ansprüche 21 bis 27, wobei die Schritte des Verarbeitens des Echtzeitbildes die Manipulation des Endeffektors (**39**, **41**) mit der Handsteuerung (**24**, **26**) korrelieren und den Schritt des Durchführens einer perspektivischen Korrektur in dem verarbeiteten Bild im Anschluss an eine seitliche Verschiebung und eine Maßstabsänderung der Vorrichtung (**19**) zur Aufnahme des Echtzeitbildes umfassen.

29. Verfahren nach einem der Ansprüche 21 bis 28, das den Schritt der dynamischen Kalibrierung einschließt, der Folgendes umfasst:
automatisches Bewirken, dass sich der Endeffektor (**39**, **41**) durch eine vorher ausgewählte Sequenz von Bezugspunkten bewegt, die in dem dreidimensionalen Raum in dem verarbeiteten Bild verteilt sind;
Anzeigen eines überdeckten Grafikpunktes in der Anzeige des Endeffektors derart, dass die Position des Punktes durch die Position der Handsteuereinrichtungen (**24**, **26**) gesteuert wird;
manuelles Registrieren, wann der Punkt auf dem Endeffektor an jedem Bezugspunkt überlagert wird; und
Herstellen einer Nachführungsbeziehung zwischen der Handsteuerung und dem Endeffektor, um dadurch die Kalibrierung herzustellen.

30. Verfahren nach einem der Ansprüche 21 bis 28, das die dynamische Kalibrierung einschließt, die Folgendes umfasst:
Anzeigen einer Darstellung eines Vierpunkte-Koordinaten-Grafikelements in einem dreidimensionalen Raum in dem verarbeiteten Bild des Endeffektors (**39**, **41**);
manuelles Registrieren, wann der Endeffektor, der durch die Steuerung der Handsteuerung (**24**, **26**) bewegbar ist, so positioniert ist, dass er jeden Bezugspunkt des Grafikelements zu berühren scheint; und
Herstellen einer Nachführungsbeziehung zwischen der Handsteuerung und dem Endeffektor.

Es folgen 7 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

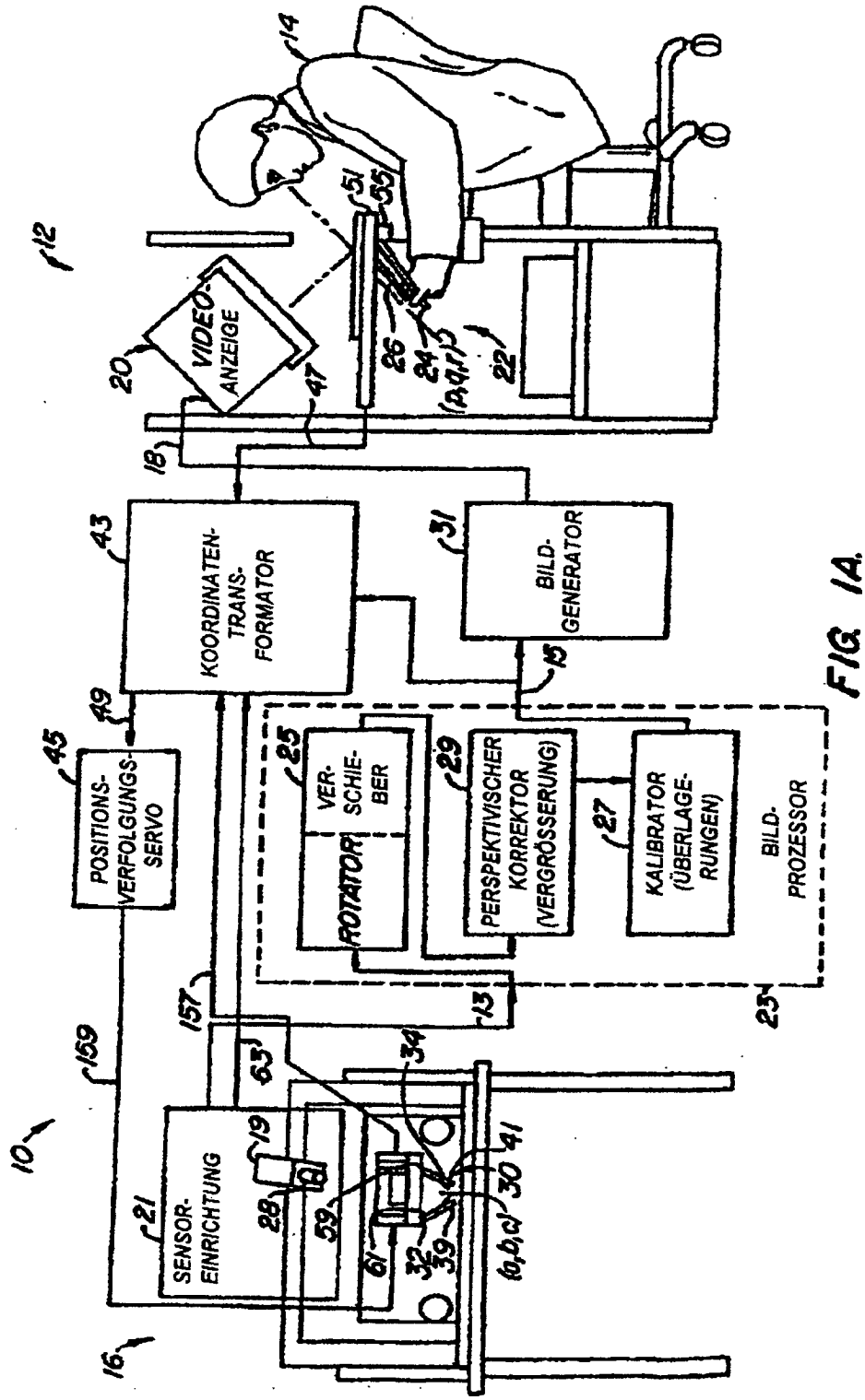

FIG 1A.

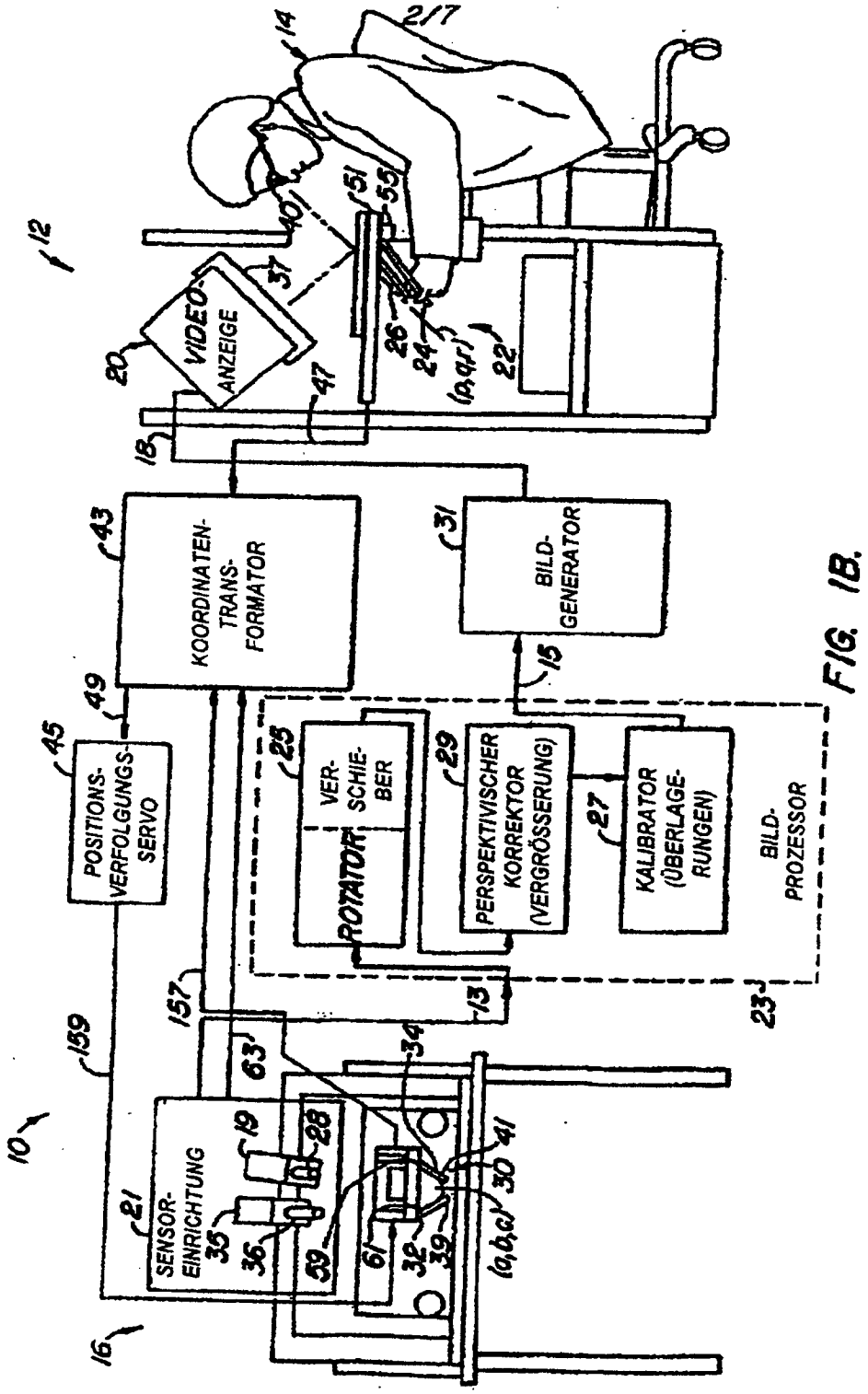
12
14
217
VIDEO-ANZEIGE
20
18
43
KOORDINATEN-TRANS-FORMATOR
31
BILD-GENERATOR
49
45
POSITIONS-VERFOLGUNGS-SERVO
25
VER-SCHIE-BER
ROTATOR
29
PERSPEKTIVISCHER KORREKTOR (VERGRÖSSERUNG)
27
KALIBRATOR (ÜBERLAGE-RUNGEN)
BILD-PROZESSOR
23
15
157
13
159
63
34
10
19
28
41
21
SENSOR-EINRICHTUNG
35
36
59
61
32
39
30
16

FIG. 1B.

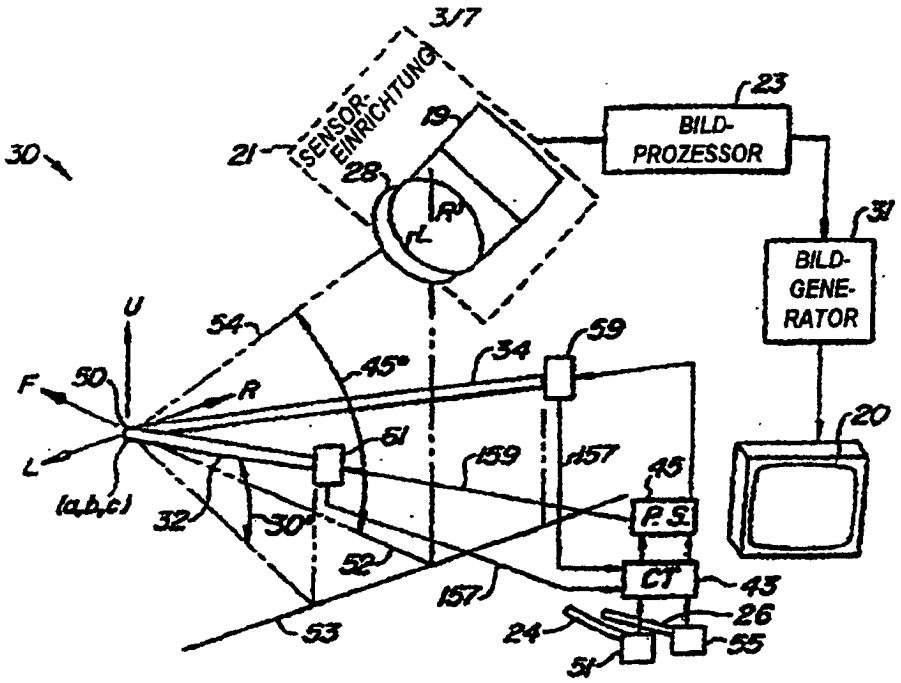
30
21
SENSOR-EINRICHTUNG
19
28
R
L
23
BILD-PROZESSOR
31
BILD-GENE-RATOR
20
U
54
45°
34
59
F
50
R
L
(a,b,c)
51
159
157
45
P.S.
32
30°
52
CT
43
157
26
53
24
55
51

FIG. 2.

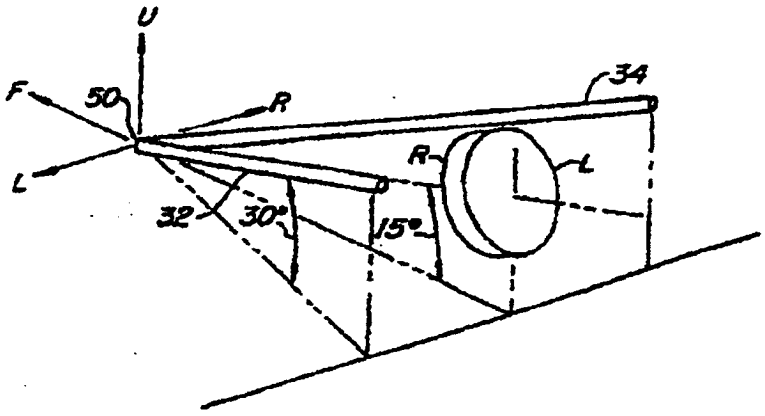
U
F
50
R
34
L
R
L
32
30°
15°

FIG. 4.

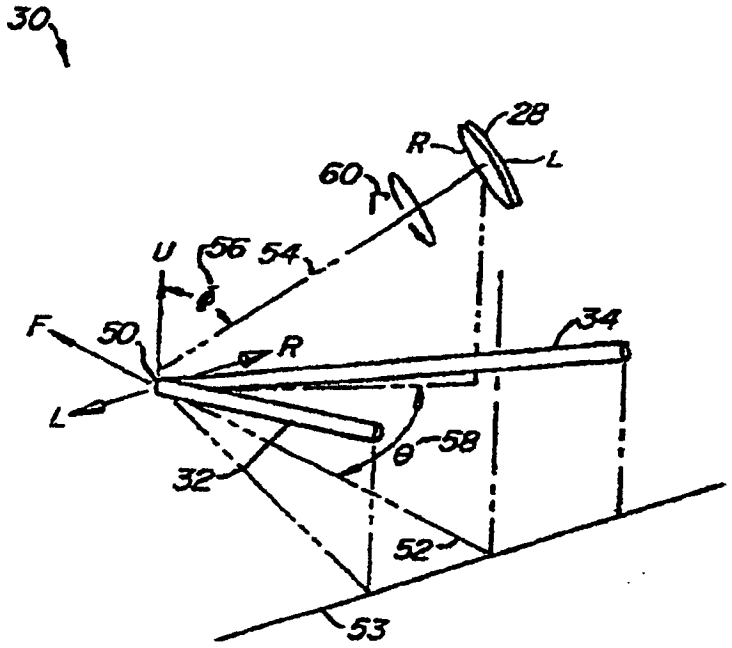

FIG. 3.

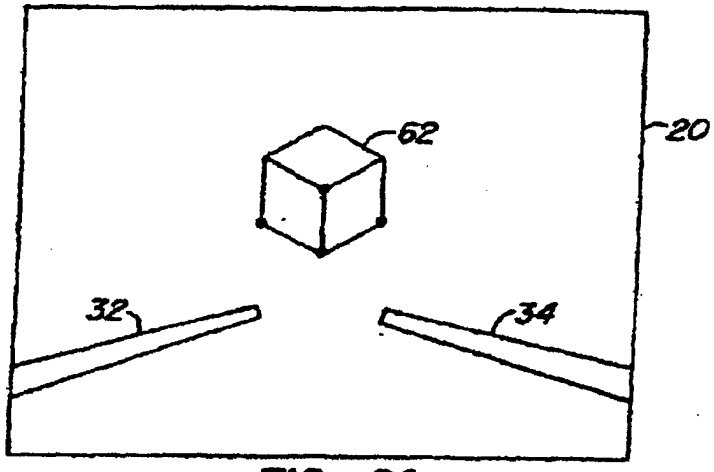

FIG. 6A.

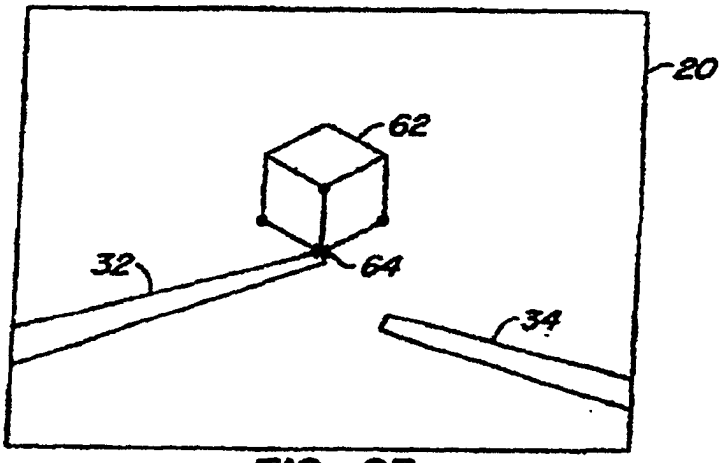

FIG. 6B.

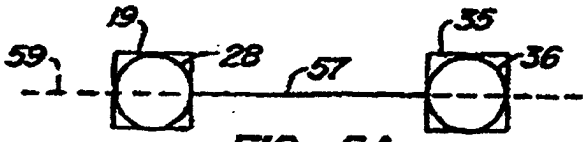

FIG. 5A.

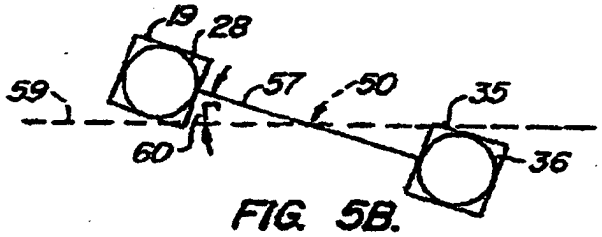

FIG. 5B.

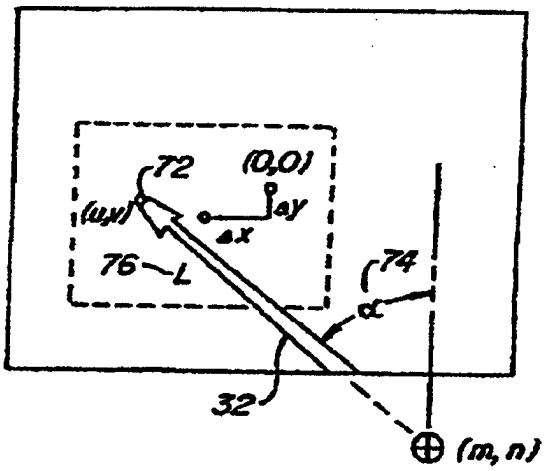

FIG. 7A

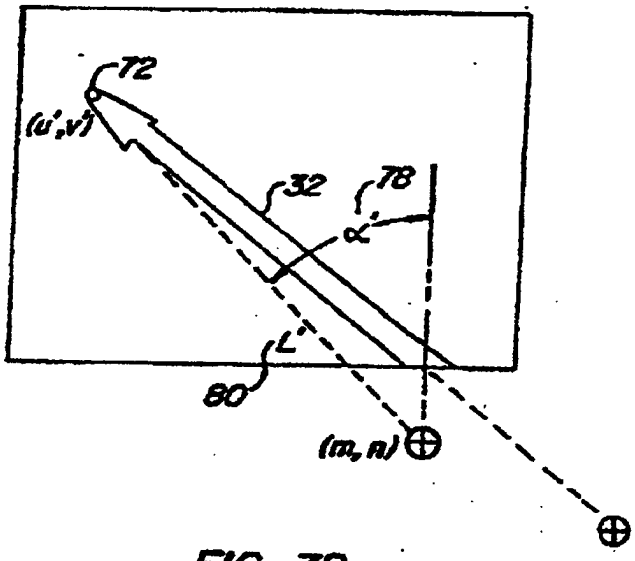

FIG. 7B

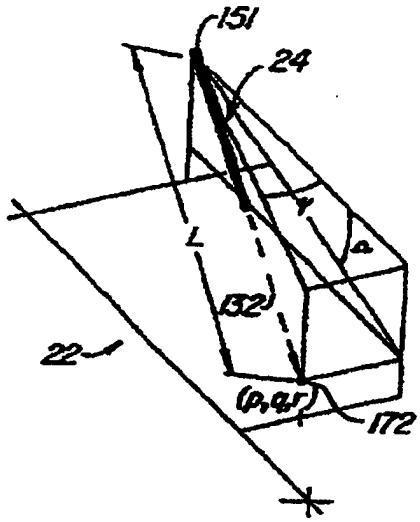

FIG. 8.

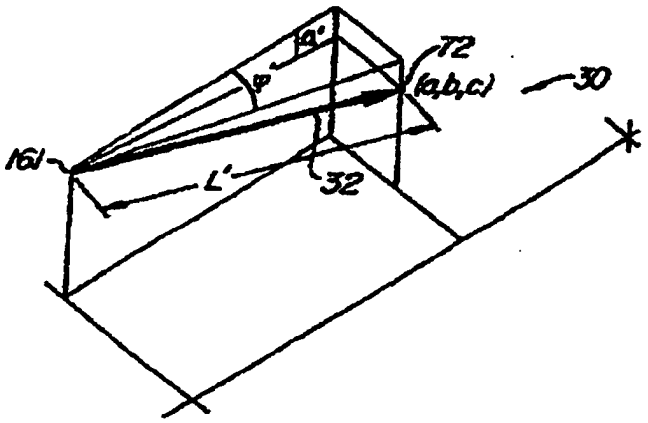

FIG. 9.