



(10) **DE 10 2012 013 511 A1** 2014.01.09

(12)

## Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2012 013 511.4**

(22) Anmeldetag: **06.07.2012**

(43) Offenlegungstag: **09.01.2014**

(51) Int Cl.: **B25J 9/02 (2012.01)**

(71) Anmelder:

**Knoll, Alois, Prof. Dr.-Ing., 49326, Melle, DE**

(72) Erfinder:

**Knoll, Alois, Prof. Dr.-Ing., 49326, Melle, DE;**  
**Nasseri, Mohammadali, M.Sc., 80807, München,**  
**DE; Eder, Martin, Dipl.-Ing. Pat.-Ing., 80689,**  
**München, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

**US 2004 / 0 024 385 A1**

**US 2010 / 0 300 230 A1**

**WO 2008/ 059 263 A2**

Rechercheantrag gemäß § 43 Abs. 1 Satz 1 PatG ist gestellt.

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen**

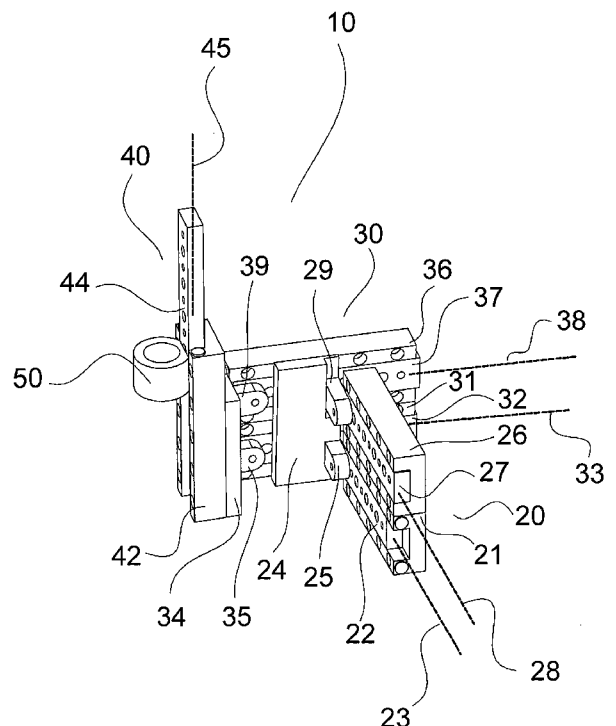
(54) Bezeichnung: **Manipulator mit serieller und paralleler Kinematik**

(57) Zusammenfassung: Manipulator (10) mit serieller und paralleler Kinematik.

Aufgabe der Erfindung ist es, einen Manipulator (10) mit serieller und paralleler Kinematik zu schaffen, welcher sehr kompakt baut, wenig Gewicht bei hoher Steifigkeit und hoher Belastbarkeit aufweist, eine sehr präzise sowie flexible Ansteuerung zulässt und damit einen sicheren Betrieb ermöglicht.

Der erfindungsgemäße Manipulator (10) wird dabei von elektrischen Aktoren, vorzugsweise Piezoaktoren, angetrieben. Für dessen Kinematik sind mindestens zwei Paar an Schubgelenken (20, 30) vorgesehen, die seriell hintereinander angeschlossen werden, wobei die einzelnen Paare wiederum selbst zueinander in paralleler Anordnung stehen und an das letzte Paar an Schubgelenken (30) ein weiteres einzelnes Schubgelenk (40) angeschlossen ist.

Manipulator zur Verwendung vorzugsweise im medizinischen Umfeld.



**Beschreibung**

**[0001]** Die Erfindung betrifft einen Manipulator entsprechend dem Oberbegriff des Anspruchs 1.

**[0002]** Bei Manipulationen im Präzisionsbereich ist es notwendig, dass die Werkzeuge der Manipulatoren im Submillimeterbereich bzw. teilweise im Mikrometer- oder gar Nanometerbereich positioniert werden. Im Vergleich zu standardmäßigen Industrierobotern, welche etwa eine Wiederholgenauigkeit im Zehntelmillimeterbereich erreichen und dadurch beispielsweise zum Schweißen von Karosserien geeignet sind, unterliegen Manipulatoren für hochpräzise Bewegungen erhöhten Anforderungen hinsichtlich Steifigkeit der Mechanik, der verbauten Antriebstechnik und Steuerungstechnik. In der Regel weisen allerdings solch genaue Manipulatoren weitaus geringere Arbeitsräume auf als die erwähnten Industrieroboter, d. h. es sind meist nur Bewegungen von wenigen Zentimetern möglich.

**[0003]** Ein Anwendungsgebiet für solch feine Manipulationen ist beispielsweise die Medizintechnik und hierbei wiederum insbesondere die Ophthalmologie. Hier sollen im Auge eines Patienten etwa Blutgefäße mit diesen Manipulatoren erreicht werden, welche Durchmesser von ca. 80 Mikrometer aufweisen. Ebenfalls hochgenaue Manipulationen sind auch im Bereich der Biotechnologie relevant, etwa bei Mikroinjektionen. Als industrieller Zweck wären Manöver im Bereich der Halbleitertechnik, Lasertechnik oder Mikromechanik zu erwähnen, in denen es ebenfalls auf genaueste Bewegungen von Manipulatoren ankommt.

**[0004]** Im Stand der Technik gibt es bereits eine Vielzahl an hochpräzisen Manipulatoren, die zur Mikro- und Nanopositionierung verwendet werden. Dabei kann es sich um einzelne Lineartische, Rotationsische, Kreuztische oder Hexapoden handeln, wie sie beispielsweise von der Firma Physik Instrumente GmbH und Co. KG in Karlsruhe vertrieben werden. Die Schrittweiten der Positionierbewegungen liegen je nach verwendeter Antriebstechnologie, welche DC-Motoren oder Piezomotoren umfassen kann, in der Größenordnung von Mikrometern bis hin zu Nanometern.

**[0005]** Weiterhin ist in der PCT-Anmeldung WO 2009/140688 A2 ein Manipulator beschrieben, welcher speziell bei Augenoperationen zum Zwecke minimalinvasiver Eingriffe verwendet werden kann und einen vorgegebenen Pivotpunkt, d. h. einen sogenannten remote center of motion (RCM) aufweist, um den sich der gesamte Mechanismus herum bewegen bzw. rotieren kann. Angetrieben wird der Mechanismus über DC-Motoren, die seriell hintereinander angeordnet sind.

**[0006]** Aus der PCT-Anmeldung WO 2009/097539 A2 ist darüber hinaus ein Verfahren und eine Vorrichtung für roboterunterstütztes mikrochirurgisches Stenting bekannt, wobei die Vorrichtung auf einer Kombination aus parallelem Roboter und seriell angeschlossenenem Werkzeug basiert. Der parallele Roboter besteht hierbei aus einem Hexapod nach Stand der Technik mit 6 parallel angesteuerten Achsen.

**[0007]** In der PCT-Anmeldung WO 2010/127109A1 wird ferner ein insbesondere für medizinische Zwecke vorgesehener Manipulator beschrieben, welcher aus 3 parallel zueinander angeordneten Achs-Subsystemen mit insgesamt 7 bis 9 Freiheitsgraden besteht, wobei die einzelnen Achs-Subsysteme aus seriell hintereinander angeordneten Gelenken aufgebaut sind. Insgesamt kann damit der Endeffektor in 6 Freiheitsgraden in redundanter Weise bewegt werden, wozu eine aufwändige Ansteuerung notwendig ist. Durch die hohe Anzahl an Gelenken und die Anordnung der zueinander parallelen Achs-Subsysteme, die wiederum an verschiedenen Raumfesten Punkten gegenüber der Umgebung verankert sind, ergibt sich ein Mechanismus, welcher durch hohen konstruktiven Aufwand bzw. sehr großes Bauvolumen gekennzeichnet und demnach in medizinischer Umgebung mit beengten Platzverhältnissen nur bedingt tauglich ist. Da mit jedem zusätzlichem Antrieb die Wahrscheinlichkeit von Oszillationen für das Gesamtsystem zunehmen, leidet die Präzision am Ende der Kinematik aufgrund der hohen Anzahl der Gelenke.

**[0008]** Für minimalinvasive Eingriffe in der Medizin-domäne mit Fokus auf die Wirbelsäule ist von der Firma Mazor Robotics Ltd., Israel, ein Operations-Assistent in Form einer geschlossenen parallelen Kinematik bekannt, der auf einem kleinen Hexapod-Roboter basiert. Der Roboter wird hierbei von 6 parallel angeordnete über DC-Kleinstmotoren angetriebene Miniaturspindeln bewegt.

**[0009]** Weiterhin ist beispielsweise aus dem wissenschaftlichen Paper „Design of a Serial-Parallel Robot with Piezo Actuators for Micro and Nano Manipulations“ (von D. Chakarov, K. Kostadinov et al, Institute of Mechanics, Sofia, Bulgarien, Proceedings of the Int. Conference on new Actuators and Drive Systems "ACTUATOR 10", Bremen, Germany, 14–16 June 2010, ISBN 978-3-933339-13-3, pp. 1058–1062, (2010)) ein Manipulator mit drei Freiheitsgraden bekannt, welcher auf einer kombinierten seriell-parallelen Kinematik beruht und einen Arbeitsbereich im Mikrometerbereich aufweist. Durch die sowohl parallele als auch serielle Struktur wird dem Manipulator einerseits eine sehr hohe Steifigkeit und Stellkräfte verliehen als auch andererseits ein großer Arbeitsraum abgedeckt. Im Paper „Synthesis of tense piezo, structures for lokal micro- and nanomanipulations“ (von D.

Chakarov, M. Abed Al-Wahab, R. Kasper und K. Kostadinov, erschienen in den Proceedings of the "8. Magdeburger Maschinenbau-Tage", October 10–11, 2007, Magdeburg, pp. 173–180) werden ferner eine Reihe von kinematischen Kombinationsmöglichkeiten von Piezoaktoren aufgezeigt, welche jeweils geschlossene kinematische Ketten darstellen.

**[0010]** Die oben genannten Manipulatoren aus dem Stand der Technik haben den Nachteil, dass sie entweder aufgrund der verwendeten Antriebstechnik mit DC-Motoren, bei denen in der Regel zusätzliche Getriebe in der Antriebseinheit nötig sind, relativ groß bzw. schwer bauen und verhältnismäßig wenig Stellkraft aufweisen oder aber aufgrund der verwendeten Piezoaktoren einen nur recht geringen Arbeitsraum aufweisen. In puncto kinematischer Struktur bieten diejenigen Manipulatoren mit serieller Kinematik vergleichsweise größere Arbeitsräume auf Kosten der Präzision bzw. mechanischen Steifigkeit, während parallele Strukturen in der Regel kleinere Bewegungsbereiche erlauben. Oftmals weisen die bisher bekannten Manipulatoren eine sehr hohe Anzahl von Gelenken auf und besitzen eine sehr komplexe Struktur, so dass sich eine Regelung teils sehr aufwändig darstellt. Weiterhin besitzen viele der Manipulatoren aus dem Stand der Technik eine Kinematik, welche bei rein translatorischer oder rein rotatorischer Bewegung bereits eine Vielzahl von Bewegungen der einzelnen Gelenke notwendig macht. Gleichermäßen eignen sich viele bekannte Manipulatoren nur wenig für Bewegungen um einen sog. remote center of motion (RCM), also für Rotationsbewegungen um einen definierbaren Drehpunkt im Raum.

**[0011]** Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, einen Manipulator mit serieller und paralleler Kinematik angetrieben von elektrischen Aktoren zu schaffen, welcher sehr kompakt baut, wenig Gewicht bei hoher Steifigkeit und hoher Belastbarkeit aufweist und dabei eine sehr präzise sowie flexible Ansteuerung zulässt und damit einen sicheren Betrieb ermöglicht.

**[0012]** Diese Aufgabe wird durch einen Manipulator mit den Merkmalen des Anspruchs 1 gelöst. Vorteilhaftige Ausgestaltungen und Weiterbildungen der Erfindung sind in den jeweiligen Unteransprüchen dargestellt.

**[0013]** Der erfindungsgemäße Manipulator sieht eine Kombination aus serieller und paralleler Kinematik vor und wird dabei von möglichst leicht bauenden und kompakten elektrischen Aktoren bzw. Elektromotoren, vorzugsweise Piezoaktoren, angetrieben. Für dessen Kinematik sind mindestens zwei Paar an Schubgelenken vorgesehen, die seriell hintereinander angeschlossen werden, wobei die einzelnen Paare wiederum selbst zueinander in paralleler Anordnung stehen und auf das letzte Paar an Schubgelenken ein weiteres einzelnes Schubgelenk ange-

schlossen ist. Das erste Paar an Schubgelenken ist dabei vorzugsweise an eine ortsfeste Basis angeschlossen, wobei diese ortsfeste Basis auch einstellbar gestaltet sein kann. Weiterhin ist das erste Paar an Schubgelenken in eine erste Richtung ausgerichtet und bietet die Möglichkeit, das damit verbundene zweite in eine zweite Richtung ausgerichtete Paar an Schubgelenken sowohl rotatorisch als auch translatorisch zu bewegen. Das zweite Paar an Schubgelenken bietet wiederum entweder dem daran angeschlossen in eine dritte Richtung ausgerichteten weiteren einzelnen Schubgelenk als letztes Gelenk die Möglichkeit, sowohl rotatorisch als auch translatorisch zu bewegen. Wahlweise können noch weitere in verschiedene Richtungen ausgerichtete Paare an Schubgelenken zwischen dem zweiten Paar an Schubgelenken und dem einzelnen Schubgelenk als letztem Gelenk integriert werden. Es ist dabei vorteilhaft hinsichtlich der erreichbaren Präzision, wenn innerhalb der Schubgelenke tatsächlich linear wirkende elektrische Aktoren verbaut sind. Es ist zwar ebenso möglich, rotatorisch wirkende Aktoren zu verwenden, welche indirekt beispielsweise über Spindeltriebe eine lineare Stellbewegung generieren, jedoch ist die Präzision hierbei erwartungsgemäß etwas geringer. Es ist ferner von Vorteil, wenn die elektrischen Aktoren jeweils direkt innerhalb der Schubgelenke integriert sind. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Schubgelenke etwa durch Seilzüge, Stabverbindungen oder Gelenkwellen von extern platzierten elektrischen Antrieben zu bewegen, allerdings ist auch hierbei die erreichbare Präzision etwas geringer als bei einer direkten Integration. Eine externe Platzierung könnte entweder über eine Montage an einer Basis des Manipulators oder sogar über eine Montage außerhalb des Manipulators auf einer externen Haltevorrichtung realisiert sein. Hinsichtlich Baugröße sind vorzugsweise Schubgelenke vorgesehen, die jeweils Stellbewegungen im Bereich von etwa 50 mm aufweisen. Allerdings sind auch erheblich kleinere Schubgelenke mit ungefähr 10 mm Stellweg möglich. Ferner kann der Manipulator auch mit wesentlich größeren Schubgelenken ausgestattet werden, womit Stellbewegungen beispielsweise im Bereich von 1 m bewerkstelligt werden, wobei hierfür dann vorzugsweise elektrische Stellzylinder bzw. Elektromotoren mit Spindeltrieben einzusetzen wären.

**[0014]** Der wesentliche Vorteil der oben erläuterten Erfindung ist, dass aufgrund der inhärenten seriellen und parallelen Kinematik dem System sowohl hohe Steifigkeit als auch hohe Stellkraftreserven sowie großer Arbeitsraum eigen sind und damit Anwendungsfelder erschlossen werden können, die ein Höchstmaß an Präzision verlangen. Die parallele Anordnung zweier Schubgelenke zu Paaren erlaubt es, doppelt so viel Stellkraft in linearer Richtung zu erzeugen wie durch ein einzelnes Gelenk. Ferner kann durch die parallele Anordnung zweier Schubgelenke eine Rotation bzw. ein äquivalentes Rotationsge-

lenk dargestellt werden, welches im Vergleich zu einem einzelnen Rotationsgelenk kräftiger ist und mehr Drehmoment generieren kann. Eine Anordnung von zwei parallelen Schubgelenken ist demnach gegenüber einer Anordnung eines Schubgelenks in Kombination mit einem seriell angehängten Rotationsgelenk im Vorteil. Durch die seitens Antriebstechnik vorzugsweise verwendeten Piezoaktoren besitzt der Manipulator geringes Bauvolumen und damit auch geringes Eigengewicht, was sich positiv auf die damit verbundenen Stellkraftreserven auswirkt, die zusätzlich durch die jeweils parallele Anordnung der Aktoren sehr hoch ausfallen. Das geringe Bauvolumen der vorzugsweise verwendeten Piezoaktoren führt dazu, dass auch Anwendungsgebiete abgedeckt werden können, bei denen platzsparende bzw. schlanke Bauweise notwendig ist, beispielsweise wenn innerhalb medizinischer Umfelder der Manipulator mit weiteren medizinischen Instrumenten, beispielsweise Mikroskopen in einer gemeinsamen Umgebung integriert werden muss. Bei Verwendung der bevorzugten Piezoaktoren als Antriebe ergibt sich hinsichtlich manueller Bewegung des Manipulators ein entscheidender Vorteil. Da die in erster Linie zu verwendenden Piezoaktoren auf einer reibschlüssigen Übertragung der Bewegung beruhen, ist es möglich, bei Bedarf manuell per Hand Bewegungen des Manipulators zu erzeugen. Im Vergleich zu anderen Aktoren sind dabei keine zusätzlichen mechanischen Bauteile wie etwa Rutschkupplungen nötig.

**[0015]** Insbesondere im Falle eines steuerungstechnischen Ausfalls des Systems ist eine solche manuelle Bedienung von hohem Nutzen. Bei sicherheitskritischen Anwendungen wie etwa bei Manipulationen im Zusammenhang mit dem Menschen ist dieser Nutzen von großer Bedeutung, da in Notfallsituationen immer noch eine manuelle Bedienung durchführbar ist. Weiterhin ist das System aufgrund der reibschlüssigen Übertragung der Kräfte innerhalb der Piezoaktoren automatisch durch die maximal übertragbaren Kräfte bezüglich seiner maximalen resultierenden Gesamtstellkraft bzw. Stellmoment limitiert, was wiederum zur Betriebssicherheit beitragen kann. Ein weiterer Vorteil des erfindungsgemäßen Manipulators ist dessen Flexibilität bei der Bewegung, insbesondere dass der remote center of motion (RCM) beliebig einstellbar ist, also eine Rotationsbewegung um einen definierbaren Drehpunkt im Raum möglich ist, kinematische Verträglichkeit des Manipulators bezüglich dieses RCM vorausgesetzt. Zudem kommt der vorgestellte Manipulator mit einer minimalen Anzahl an Gelenken bei höchster Bewegungsmöglichkeit aus. Dank der sowohl seriellen als auch parallelen Anordnung der Gelenke sind während einzelner rotatorischer bzw. translatorischer Bewegungen des Manipulators nur eine sehr geringe Anzahl an Gelenken aktiv, wodurch sich der Manipulator mit geringster Neigung zum Schwingen sehr steif bewegen kann. Bei Bewegungen rein in x-, y-, oder z-Rich-

tung bzw. bei Rotationen um diese Achsen sind jeweils nur ein Paar an Schubgelenken aktiv. Im Gegensatz zur Anordnung von Antrieben wie bei z. B. bei herkömmlichen Knickarmrobotern direkt an den zu bewegenden Gelenken, befinden sich die Antriebe beim vorgestellten Manipulator jeweils näher an der Basis des Manipulators und nicht am Ende der jeweils zueinander parallel stehende Paare an Schubgelenken. Demzufolge rückt der Schwerpunkt jedes einzelnen Paares an Schubgelenken weiter in Richtung Basis des Manipulators, so dass Gravitationslasten und insbesondere Massenträgheitsmomente reduziert werden, insofern dynamische Bewegungen schwingungsarm erfolgen können.

**[0016]** Die Erfindung wird im Folgenden beispielsweise anhand der Zeichnungen näher erläutert. Es zeigen:

**[0017]** Fig. 1: eine perspektivische Ansicht eines Manipulators mit serieller und paralleler Kinematik.

**[0018]** Fig. 2: eine perspektivische Ansicht eines Piezoaktors des Manipulators.

**[0019]** Fig. 3: eine perspektivische Ansicht eines Manipulators mit zusätzlichem manuell bewegbarem Schubgelenk an der Basis

**[0020]** Fig. 4: eine perspektivische Ansicht eines Manipulators nach Fig. 3 mit zusätzlicher Brille und verstellbarem Gestänge

**[0021]** Fig. 5: eine perspektivische Ansicht eines Manipulators nach Fig. 4 mit Montage auf einem Operationstisch

**[0022]** Fig. 6: eine perspektivische Darstellung eines Gesamtsystems für den Einsatz in medizinischer Umgebung

**[0023]** In den verschiedenen Figuren sind einander entsprechende Bauelemente mit gleichen Bezugszeichen versehen.

**[0024]** In Fig. 1 wird eine perspektivische Ansicht eines Manipulators mit serieller und paralleler Kinematik dargestellt, der über elektrische Aktoren, insbesondere Piezoaktoren, angetrieben wird. Der Manipulator **10** weist hierbei ein erstes Paar an Schubgelenken **20** auf, welches aus zwei zueinander parallelen linearen Piezoaktoren besteht. Die Piezoaktoren besitzen hierbei Schrittweiten, die bis in den Nanometer-Bereich gehen können und aus steuerungstechnischer Sicht lediglich durch die Auflösung hochgenauer Positionsmesssysteme limitiert werden, beispielsweise im Bereich von Mikrometern. Der erste Piezoaktor besteht aus einem statischen Gehäuse **21** und einem beweglichen Schlitten **22**, wobei sich der bewegliche Schlitten **22** entlang der ersten Achse

**23** vor- und zurückbewegen kann. Am beweglichen Schlitten **22** ist ein Anschlussstück **24** angeschlossen, welches über ein Lager **25**, beispielsweise ein Rillenkugellager, drehbar mit dem beweglichen Schlitten **22** verbunden ist. Der zweite Piezoaktor besteht ebenso wie der erste aus einem statischen Gehäuse **26** und einem beweglichen Schlitten **27**, welcher sich entlang der zweiten Achse **28** vor- und zurückbewegen kann. Wiederum ist am beweglichen Schlitten **27** dasselbe Anschlussstück **24** angeschlossen, welches über ein verschiebliches Lager **29** drehbar mit dem beweglichen Schlitten **27** verbunden ist. Das verschiebliche Lager **29** kann hierbei aus einem Rillenkugellager bestehen, welches auf einer Linearschiene montiert ist. Das Rillenkugellager sorgt für den nötigen rotatorischen Freiheitsgrad, die Linearschiene sorgt den nötigen translatorischen Freiheitsgrad. Sofern die beiden Piezoaktoren des ersten Paares an Schubgelenken **20** gleichmäßig angesteuert werden, ergibt sich eine zueinander synchrone Bewegung der beweglichen Schlitten **22** bzw. **27** und daher eine rein translatorische Bewegung des Anschlussstücks **24**, an welches das zweite Paar an Schubgelenken **30** angeschlossen ist. Sobald die Bewegung der beiden beweglichen Schlitten **22** bzw. **27** nicht synchron gesteuert wird, ergibt sich eine zusätzliche Rotationsbewegung, die durch das Lager **25** und das verschiebliche Lager **29** an das Anschlussstück **24** und damit an das zweite Paar an Schubgelenken **30** weitergeleitet wird. Bei asynchroner Ansteuerung resultiert demnach eine translatorische Bewegung, die von einer rotatorischen Bewegung überlagert wird. Um die bei der rotatorischen Bewegung auftretende Abstandsänderung an den Aufhängepunkten am Anschlussstück **24** mechanisch freizugeben, ist lediglich das Lager **25** fest mit dem Anschlussstück **24** verbunden, während die zweite Lagerstelle über ein verschiebliches Lager **29** realisiert ist, welches durch eine vorzugsweise verwendete Linearschiene verschieblich gegenüber der ersten Lagerstelle des Lagers **25** gestaltet ist. Weiterhin weist der Manipulator **10** ein zweites Paar an Schubgelenken **30** auf, welches vorzugsweise in orthogonaler Anordnung gegenüber dem ersten Paar an Schubgelenken **20** steht und an dieses seriell angeschlossen ist. Analog zum ersten Paar an Schubgelenken **20** besitzt das zweite Paar an Schubgelenken **30** einen ersten Piezoaktor mit einem statischen Gehäuse **31** und einem beweglichen Schlitten **32**, der sich entlang der dritten Achse **33** vor- und zurückbewegen kann. Der zweite zum ersten Piezoaktor parallele Piezoaktor dieser Einheit besteht entsprechend aus einem statischen Gehäuse **36** und einem beweglichen Schlitten **37**, der sich entlang der vierten Achse **38** vor- und zurückbewegen kann. Mechanisch äquivalent zum ersten Paar an Schubgelenken **20** besitzt das zweite Paar an Schubgelenken **30** ein Anschlussstück **34** mit einem Lager **35** und einem verschieblichen Lager **39**. An das Anschlussstück **34** schließt sich ein weiteres einzelnes Schubgelenk **40** an, das vorzugsweise wiederum in orthogonaler Anordnung ge-

genüber dem zweiten Paar an Schubgelenken **30** steht und seriell an dieses angeschlossen ist. Dieses einzelne Schubgelenk **40** besteht aus einem Piezoaktor mit einem statischen Gehäuse **42** und einem beweglichen Schlitten **44**, der sich entlang der fünften Achse **45** vor- und zurückbewegen kann. Am beweglichen Schlitten **44** des einzelnen Schubgelenks **40** befindet sich ferner eine Aufnahmevorrichtung **50** zur Fixierung eines Werkzeugs, beispielsweise eines medizinischen Operationsinstruments wie eine innerhalb der vitreoretinalen Ophthalmologie eingesetzte Injektionsnadel. Darüber hinaus kann die Aufnahmevorrichtung **50** über einen nicht dargestellten Schnellverschluss aufweisen, so dass montierte Werkzeuge oder ophthalmologische Operationsinstrumente innerhalb kürzester Zeit gewechselt werden können. Der Manipulator **10** nach **Fig. 1** weist demnach fünf voneinander unabhängige Piezoaktoren auf, welche sowohl seriell als auch parallel zueinander angeschlossen sind und demnach eine Kombination aus serieller und paralleler Kinematik ergeben. Für den Fall, dass die Piezoaktoren des ersten Paares an Schubgelenken **20** und des zweiten Paares an Schubgelenken **30** jeweils paarweise synchron angesteuert werden, resultiert zusammen mit dem weiteren einzelnen Schubgelenk **40** ein Mechanismus, der ähnlich einem xyz-Positioniersystem arbeitet, d. h. dass drei zueinander orthogonale translatorische Bewegungen möglich sind. Sofern die Piezoaktoren der einzelnen Paare an Schubgelenken **20** und bzw. oder **30** asynchron gesteuert werden, resultieren sowohl rotatorische als auch translatorische Bewegungen des Mechanismus. Das Verhältnis aus translatorischem und rotatorischem Anteil der Bewegung kann hierbei beliebig durch entsprechend ausgeprägte synchrone bzw. asynchrone Ansteuerung realisiert werden. Insofern sind im Falle asynchroner Ansteuerung neben translatorischen xyz-Bewegungen auch Kippbewegungen um zwei weitere Achsen möglich, weswegen der Mechanismus **5** Freiheitsgrade insgesamt aufweist. Darüber hinaus ist es von Vorteil, wenn der Manipulator **10** mit einer sterilisierbaren Hülle, beispielsweise einer Kunststoffhülle umgeben ist, welche bei medizinischen Anwendungen stets nach einer Operation gewechselt werden kann. Eine von **Fig. 1** abgeleitete Variante des Manipulators **10** könnte so aussehen, dass anstelle der direkt auf dem einzelnen Schubgelenk **40** bzw. dem beweglichen Schlitten **44** montierten Aufnahmevorrichtung **50** ein weiteres Drehgelenk zwischengeschlossen ist, vorteilhafterweise in Form eines rotatorischen Piezoaktors, so dass die Aufnahmevorrichtung **50** selbst wiederum eine zusätzliche Rotationsbewegung koaxial zur translatorischen Bewegung des einzelnen Schubgelenks **40** entlang Achse **45** ausführen kann. Insofern hätte diese Variante **6** Freiheitsgrade im Raum und würde die Möglichkeit bieten, montierte Werkzeuge längs ihrer Achse kontrolliert rotieren zu lassen. Eine weitere Alternative zu der in **Fig. 1** vorgestellten Ausprägungsform des Manipulators **10** oder

als zusätzliche Ergänzung zur eben genannten abgeleiteten Variante mit weiterem rotatorischen Piezoaktor kann das einzelne Schubgelenk **40** bzw. dessen beweglicher Schlitten **44** über einen zusätzlichen Kraftsensor verfügen, welcher koaxial zu diesem Gelenk ausgerichtet ist und die Kräfte längs der Achse **45** detektieren kann. Dadurch können Applikationen realisiert werden, die besonders sensibel hinsichtlich der ausgeübten Kräfte des Manipulators **10** an dessen beweglichen Schlitten **44** mit montierter Aufnahmeverrichtung **50** für ein Werkzeug sind.

**[0025]** In Fig. 2 ist eine perspektivische detaillierte Ansicht eines beispielhaften Piezoaktors des Manipulators dargestellt. Alle bereits in Fig. 1 beschriebenen Piezoaktoren sind grundsätzlich analog zu dem hier erläuterten Piezoaktor aufgebaut, können allerdings auch unterschiedliche Stellwege, Stellkräfte bzw. mechanische Dimension aufweisen. Der Piezoaktor, der jeweils einen einzelnen Teil eines Paares an Schubgelenken darstellt, besteht wie in Fig. 1 erwähnt aus einem statischen Gehäuse **21**. Dieses statische Gehäuse **21** bietet mit seinen Durchgangsbohrungen Montagemöglichkeiten zur Fixierung an weitere externe Elemente und beinhaltet ein Linearlager, das beispielsweise als sehr steifes Kreuzrollenlager ausgeführt sein kann. Das Linearlager führt dabei den beweglichen Schlitten **22**, der sich entlang der Achse **23** vor- und zurückbewegen kann. Das Wirkprinzip des Piezoaktors selbst kann beispielsweise auf einem Trägheitsantrieb basieren, vorzugsweise auf einem Stick-Slip-Antrieb, wie etwa in der WO 2008/052785 A1 beschrieben. Damit kann der bewegliche Schlitten **22** schrittweise in Nanometer-Skalierung bewegt werden, etwa mit 50 Nanometer Schrittweite. Darüber hinaus beinhaltet der Piezoaktor ein lineares Positionsmesssystem **60**, der vorzugsweise als ein optischer inkrementeller Encoder mit mindestens Mikrometer-Auflösung ausgeprägt ist und idealerweise direkt zwischen dem statischen Gehäuse **21** und dem beweglichen Schlitten **22** sitzt und die lineare Bewegung zwischen dem statischen Gehäuse **21** und dem beweglichen Schlitten **22** detektiert. Das lineare Positionsmesssystem **60** kann beispielhaft als Sinus-Cosinus-Geber ausgeführt sein. Kommerziell verfügbar ist eine solcher Piezoaktor in Form einer Linearpositioniereinheit etwa von der Firma SmarAct GmbH, beispielsweise mit einer Baulänge von 50 Millimeter bei 31 Millimeter Stellweg mit einem Gewicht von nur 32 Gramm und einer Stellkraft von bis zu 5 Newton. Alternativ zu den oben beschriebenen Piezoaktor-Typen auf Basis eines Trägheitsantriebs bzw. eines Stick-Slip-Antriebs ist der erfindungsgemäße Manipulator **10** auch mittels Piezoaktoren darstellbar, die jeweils aus einer Reihe von piezoelektrischen bimorphen Beinen bestehen, wie sie etwa von der Firma Dr. Fritz Faulhaber GmbH & Co. KG vertrieben werden.

**[0026]** In Fig. 3 ist eine perspektivische Ansicht eines Manipulators **10** mit zusätzlichem manuell bewegbaren Schubgelenk **70** an der Basis des Manipulators **10** abgebildet. Das manuell bewegbare Schubgelenk **70** besteht aus einer statischen Schiene **72**, auf welchem ein Schlittenelement **74** läuft, das über ein Arretierelement **76** arretiert werden kann. Damit kann der komplette Manipulator **10** entlang der Achse **78** verstellt werden, was insbesondere zu Zwecken der Grobpositionierung des Manipulators **10** von Vorteil ist. In einer nicht gezeigten Ausprägungsform kann das manuell bewegbare Schubgelenk **70** auch über einen kleinen Elektromotor automatisiert angetrieben werden, wobei dann vorzugsweise ein zusätzliches lineares Positionsmesssystem (vgl. **60** aus Fig. 2) zwischen der statischen Schiene **72** und dem Schlittenelement **74** verbaut werden sollte, um die Position des Schlittenelements **74** auf der statischen Schiene **72** zu detektieren. In der in Fig. 3 abgebildeten Form befindet sich das manuell bewegbare Schubgelenk **70** in orthogonaler Anordnung gegenüber dem Manipulator **10**, jedoch sind auch andere Anordnungen denkbar, beispielsweise mit Winkeln größer oder kleiner 90 Grad.

**[0027]** Fig. 4 zeigt eine perspektivische Ansicht eines Manipulators **10** nach Fig. 3 mit zusätzlicher Brille **80** und verstellbarem Gestänge **90** und **92**. Dieser Aufbau ist vor allem dann vorteilhaft, wenn es sich um medizinische Anwendungen handelt, insbesondere um Augenoperationen. Mittels der Brille **80**, das vom verstellbaren Gestänge **90** und **92** stabilisiert wird, ist eine feste Fixierung des Manipulators **10** auf dem Kopf eines Patienten möglich, so dass sich der Manipulator **10** nicht mehr relativ gegenüber dem Kopf des Patienten bewegen kann. Gleichzeitig wird mit diesem Aufbau der Kopf des Patienten selbst stabilisiert, d. h. in seiner Lage bzw. Position gehalten, da die Brille **80** fest auf dem Kopf des Patienten anliegt. Das manuell bewegbare Schubgelenk **70** ist hierbei auf einer Brille **80** montiert, welche einem Patienten auf den Kopf bzw. auf das Gesicht gesetzt werden kann. Die Brille **80** besitzt eine rutschfeste Auflage **82**, die ein Verrutschen der Brille **80** auf dem Gesicht des Patienten verhindert. Ferner besitzt die Brille **80** an der Stelle der Nase des Patienten eine Aussparung für die Nase **84**. Die Brille **80** ist demnach weitestgehend analog einer Skibrille oder Schutzbrille aufgebaut. An den beiden Seitenflächen der Brille **80** sind jeweils verstellbare Gestänge **90** und **92** angebracht, die eine Fixierung der Brille **80** auf einem externen Element, beispielsweise einem Operationstisch oder Krankenbett ermöglichen. Die verstellbaren Gestänge **90** und **92** besitzen vorzugsweise Gelenke, die per Hand verstellt und arretiert werden können.

**[0028]** In Fig. 5 ist eine perspektivische Ansicht eines Manipulators **10** nach Fig. 4 mit Montage auf einem Operationstisch **100** abgebildet. Dieser Aufbau

ist für Applikationen innerhalb medizinischer Domänen zweckmäßig. Der Manipulator **10** sitzt auf einem manuell bewegbaren Schubgelenk **70**, das über eine Brille **80** und verstellbare Gestänge **90** und **92** an einem Kopfteil **110** eines Operationstisches **100** fixiert ist. Auf dem Operationstisch **100** kann ein hier nicht dargestellter Patient liegen, dessen Kopf entsprechend auf dem Kopfteil **110** ruht.

**[0029]** Fig. 6 zeigt als erweiterte Ausprägungsform des erfindungsgemäßen Manipulators **10** eine perspektivische Darstellung eines Gesamtsystems für den Einsatz in medizinischer Umgebung. Die bereits in Fig. 4 und Fig. 5 beschriebenen Elemente werden innerhalb des in Fig. 6 dargestellten Gesamtsystems mit weiteren Komponenten vereint. Der Manipulator **10** wird durch einen nicht dargestellten Bediener mindestens von einer Eingabekonsolen **120**, vorzugsweise von einer weiteren zweiten Eingabekonsolen **130** indirekt gesteuert. Die Eingabekonsolen **120** und **130** sind dabei als haptische Eingabekonsolen zu verstehen, wie sie im Stand der Technik beispielsweise von der Firma Sensable aus Willington, Massachusetts, USA, vertrieben werden. Zudem besteht die Möglichkeit, diese Eingabekonsolen **120** und **130** mit force feedback Technologie auszustatten, so dass die Steuerelemente dieser Eingabekonsolen nicht nur passiv bewegt werden können, sondern aktiv bewegt werden von einer Steuerung. Daneben ist es von Vorteil, wenn der Gesamtaufbau weiterhin ein nicht in Fig. 6 dargestelltes Mikroskop umfasst, welches dem Bediener während der Arbeit mit dem Manipulator **10** steht Rückmeldung über die Position des am Manipulator **10** befindlichen Werkzeugs bzw. über den Zustand des zu manipulierenden Arbeitsraums gibt. Hierbei bieten die kompakten Abmessungen des Manipulators **10** besondere Vorteile, da anderweitig die Sicht durch das Mikroskop teilweise durch den Manipulator **10** selbst beeinträchtigt werden könnte, d. h. dass das vom Mikroskop resultierende Bild von einem Manipulator (**10**) mit zu großem Bauvolumen verdeckt werden könnte. Der Manipulator **10** ist direkt mit einer Verstärkereinheit **140** verbunden, welche die Piezoaktoren des Manipulators **10** leistungstechnisch versorgt bzw. die Positionssensoren dieser Piezoaktoren signaltechnisch auswertet. Die Verstärkereinheit **140** ist selbst mit einem Mikrokontroller **150** verbunden, welcher die Regelung des Manipulators **10** bzw. seiner Piezoaktoren auf unterster Ebene durchführt. Der Mikrokontroller **150** ist ferner an eine übergeordnete Steuereinheit **160** angeschlossen, welche eine Regelung auf oberer Ebene übernimmt. Damit die Ansteuerung echtzeitfähig ist, müssen alle genannten Komponenten entsprechende Anforderungen an die Echtzeitfähigkeit erfüllen. Die Regelung auf oberer Ebene beinhaltet die Integration der Eingabesignale der Eingabekonsolen **120** und **130** sowie die entsprechende Bahnplanung der einzelnen Piezoaktoren des Manipulators **10**. Ferner kann die Steuereinheit **160** da-

zu verwendet werden, Steuersignale für die Eingabekonsolen **120** und **130** auszuleiten, damit diese aktiv bewegt werden im Sinne einer force feedback Ansteuerung. Hierzu ist es insbesondere von Vorteil, wenn der Manipulator **10** nahe seiner Aufnahmevorrichtung **50** für ein Werkzeug bzw. am Piezoaktor des einzelnen Schubgelenks **40** ein Kraftsensor verbaut ist.

**[0030]** In einem weiteren nicht innerhalb einer Figur dargestellten Ausführungsbeispiel sind anstelle von Piezoaktoren wesentlich größere elektrische Stellzylinder, vorzugsweise Elektromotoren mit Spindeltrieben, für sämtliche Schubgelenke des Manipulators vorgesehen, die jeweils eine Stellbewegung im Bereich von etwa 1 m ermöglichen. Auf diese Weise ergibt sich ein in kinematischer Hinsicht identischer zu dem beispielhaft in Fig. 1 gezeigten Manipulator mit einem erheblich größerem Arbeitsraum. Hinsichtlich der erreichbaren Präzision sind jedoch Stellbewegungen im Nanometer-Bereich mit einer solch makroskopischen Ausdehnung des Manipulators nicht mehr möglich, vielmehr liegt die Genauigkeit dann im Bereich von 10 Mikrometern oder mehr.

**[0031]** Ein weiteres Ausführungsbeispiel ohne eigene Figur stellt ein Manipulator dar, bei welchem die Schubgelenke über geeignete Übertragungsmittel, wahlweise über Seile, Gelenkwellen oder Stabverbindungen von gegenüber den Gelenken des Manipulators abgesetzten elektrischen Antrieben bewegt werden. Diese Anordnung hat den Vorteil, dass der Manipulator selbst ohne die eigentlichen Antriebe auskommt und daher kompakter gebaut werden kann. Allerdings wird durch die Mehrzahl an Komponenten zur Übertragung der Bewegungen eine geringere Präzision des Manipulators in Kauf genommen. Die elektrischen Antriebe können entweder an einer Basis des Manipulators fixiert werden oder in etwas weiterer Entfernung auf einer eigenen Haltevorrichtung montiert sein. Die Schubgelenke selbst müssen dafür jeweils eine entsprechende mechanische Schnittstelle aufweisen, welche die Bewegungen des abgesetzten Aktors jeweils auf den linear beweglichen Teil des Schubgelenks übertragen. Beispielsweise kann eine lineare Stellbewegung eines Seils in eine Rotationsbewegung einer Spindel übertragen werden, welche wiederum einer Spindelmutter innerhalb des Schubgelenks eine translatorische Bewegung aufträgt.

## ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

*Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.*

### Zitierte Patentliteratur

- WO 2009/140688 A2 [0005]
- WO 2009/097539 A2 [0006]
- WO 2010/127109 A1 [0007]
- WO 2008/052785 A1 [0025]

### Zitierte Nicht-Patentliteratur

- „Design of a Serial-Parallel Robot with Piezo Actuators for Micro and Nano Manipulations” (von D. Chakarov, K. Kostadinov et al, Institute of Mechanics, Sofia, Bulgarien, Proceedings of the Int. Conference an new Actuators and Drive Systems ”ACTUATOR 10”, Bremen, Germany, 14–16 June 2010, ISBN 978-3-933339-13-3, pp. 1058–1062, (2010)) [0009]
- „Synthesis of tense piezo, structures for lokal micro- and nanomanipulations” (von D. Chakarov, M. Abed Al-Wahab, R. Kasper und K. Kostadinov, erschienen in den Proceedings of the ”8. Magdeburger Maschinenbau-Tage”, October 10–11, 2007, Magdeburg, pp. 173–180) [0009]



### Patentansprüche

1. Manipulator (10) mit serieller und paralleler Kinematik angetrieben von elektrischen Aktoren **dadurch gekennzeichnet**, dass für die Kinematik des Manipulators (10) mindestens zwei Paar an Schubgelenken (20, 30) vorgesehen sind, wobei diese seriell hintereinander sowohl rotatorisch als auch translatorisch beweglich verbunden und in mindestens zwei verschiedene Richtungen ausgerichtet sind, sowie die einzelnen Paare wiederum selbst zueinander in paralleler Anordnung stehen und an das letzte Paar an Schubgelenken (30) ein weiteres einzelnes Schubgelenk (40) sowohl rotatorisch als auch translatorisch beweglich angeschlossen ist und dieses einzelne Schubgelenk (40) in eine weitere Richtung ausgerichtet ist.

2. Manipulator (10) nach Anspruch 1 **dadurch gekennzeichnet**, dass eine Bewegung um einen frei definierbaren remote center of motion möglich ist.

3. Manipulator (10) nach Anspruch 2 **dadurch gekennzeichnet**, dass als elektrische Aktoren Piezoaktoren verwendet werden.

4. Manipulator (10) nach Anspruch 3 **dadurch gekennzeichnet**, dass Piezoaktoren, die auf Trägheitsantriebsvorrichtungen basieren, verwendet werden.

5. Manipulator (10) nach Anspruch 4 **dadurch gekennzeichnet**, dass Stick-Slip-Antriebe verwendet werden.

6. Manipulator (10) nach Anspruch 3 **dadurch gekennzeichnet**, dass Piezoaktoren, welche jeweils aus einer Reihe von piezoelektrischen bimorphen Beinen bestehen, verwendet werden.

7. Manipulator (10) nach einem der vorhergehenden Ansprüche **dadurch gekennzeichnet**, dass die seriell hintereinander angeschlossenen Paare an Schubgelenken (20, 30) sowie das letzte einzelne Schubgelenk (40) in jeweils orthogonaler Anordnung zueinander stehen.

8. Manipulator (10) nach einem der vorhergehenden Ansprüche **dadurch gekennzeichnet**, dass der Manipulator (10) genau zwei Paar an Schubgelenken (20, 30) aufweist, wobei an das zweite Paar an Schubgelenken (30) ein weiteres einzelnes Schubgelenk (40) mit Piezoaktor angeschlossen ist und damit der Manipulator (10) insgesamt fünf mit Piezoaktoren steuerbare Freiheitsgrade aufweist.

9. Manipulator (10) nach einem der vorhergehenden Ansprüche **dadurch gekennzeichnet**, dass sich an der Basis des Manipulators (10) zusätzlich ein manuell bewegbares Schubgelenk (70) zur Grobpositionierung des Manipulators (10) befindet.

10. Manipulator (10) nach Anspruch 9 **dadurch gekennzeichnet**, dass das manuell bewegbare Schubgelenk (70) in orthogonaler Anordnung gegenüber den angehängten Gelenken des Manipulators (10) angeschlossen wird.

11. Manipulator (10) nach einem der vorhergehenden Ansprüche **dadurch gekennzeichnet**, dass an das letzte weitere einzelne Schubgelenk (40) ein zusätzliches koaxiales Drehgelenk in Form eines rotatorischen Piezoaktors angeschlossen ist und damit einen zusätzlichen über diesen Piezoaktor steuerbaren Freiheitsgrad aufweist.

12. Manipulator (10) nach Anspruch 11 **dadurch gekennzeichnet**, dass der Manipulator (10) genau zwei Paar an Schubgelenken (20, 30) aufweist, wobei an das zweite Paar an Schubgelenken (30) ein weiteres einzelnes Schubgelenk (40) angeschlossen ist und auf letzterem wiederum ein zusätzliches koaxiales Drehgelenk angeordnet ist und damit der Manipulator (10) insgesamt sechs mit Piezoaktoren steuerbare Freiheitsgrade aufweist.

13. Manipulator (10) nach einem der vorhergehenden Ansprüche **dadurch gekennzeichnet**, dass jedes Schubgelenk des Manipulators (10) über eine lineare Positionsmesssystem (60) verfügt.

14. Manipulator (10) nach Anspruch 13 **dadurch gekennzeichnet**, dass das lineare Positionsmesssystem (60) aus einem optischen Encoder mit einer Auflösung mindestens im Mikrometer-Bereich besteht.

15. Manipulator (10) nach einem der vorhergehenden Ansprüche **dadurch gekennzeichnet**, dass entweder das letzte weitere einzelne Schubgelenk (40) oder das zusätzliche koaxiale Drehgelenk des Manipulators (10) weiterhin über einen Kraftsensor verfügt und der Kraftsensor koaxial zu diesem Gelenk ausgerichtet ist.

16. Manipulator (10) nach einem der vorhergehenden Ansprüche **dadurch gekennzeichnet**, dass die Basis des Manipulators (10) auf einer Brille (80) montiert ist und die Brille (80) auf dem Kopf einer Person fixiert werden kann.

17. Manipulator (10) nach Anspruch 16 **dadurch gekennzeichnet**, dass die Brille (80) von einem verstellbaren Gestänge (90, 92) gehalten wird.

18. Manipulator (10) nach Anspruch 17 **dadurch gekennzeichnet**, dass die Basis des verstellbaren Gestänges (90, 92) an einem Kopfteil (110) eines Operationstisches (100) fixiert ist.

19. Manipulator (10) nach einem der vorhergehenden Ansprüche **dadurch gekennzeichnet**, dass der

Manipulator (10) für operative Zwecke in der Medizin, insbesondere in der Ophthalmologie dient.

20. Manipulator (10) nach Anspruch einem der vorhergehenden Ansprüche **dadurch gekennzeichnet**, dass der Manipulator (10) eine zusätzliche sterilisierbare Hülle aufweist.

21. Manipulator (10) nach einem der vorhergehenden Ansprüche **dadurch gekennzeichnet**, dass das letzte Gelenk des Manipulators (10) eine Aufnahmevorrichtung (50) zur Fixierung eines Werkzeugs, vorzugsweise eines ophthalmologischen Operationsinstruments, aufweist.

22. Manipulator (10) nach Anspruch 21 **dadurch gekennzeichnet**, dass die Aufnahmevorrichtung (50) einen Schnellverschluss aufweist, so dass montierte Werkzeuge, insbesondere ophthalmologische Operationsinstrumente, innerhalb kürzester Zeit gewechselt werden können.

23. Manipulator (10) nach einem der vorhergehenden Ansprüche **dadurch gekennzeichnet**, dass der Manipulator (10) für operative Zwecke in der vitreoretinalen Ophthalmologie dient.

24. Manipulator (10) nach einem der vorhergehenden Ansprüche **dadurch gekennzeichnet**, dass der Manipulator (10) zur Mikroinjektion verwendet wird.

25. Manipulator (10) nach einem der vorhergehenden Ansprüche **dadurch gekennzeichnet**, dass eine echtzeitfähige Steuerung die Steuerung des Manipulators (10) übernimmt, welche über eine Steuereinheit (160), einen Mikrokontroller (150), eine Verstärkereinheit (140) und mindestens eine Eingabekonsolle (120) realisiert ist.

26. Manipulator (10) nach einem der vorhergehenden Ansprüche **dadurch gekennzeichnet**, dass die Schubgelenke (20, 30, 40) durch elektrische Antriebe angetrieben werden, welche gegenüber den Schubgelenken (20, 30, 40) des Manipulators (10) abgesetzte Positionen aufweisen, wobei die Übertragung der Bewegung von den abgesetzt positionierten elektrischen Antrieben hin zu den Schubgelenken (20, 30, 40) über geeignete Übertragungsmittel stattfindet, vorzugsweise Gelenkwellen.

Es folgen 6 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

Fig. 1

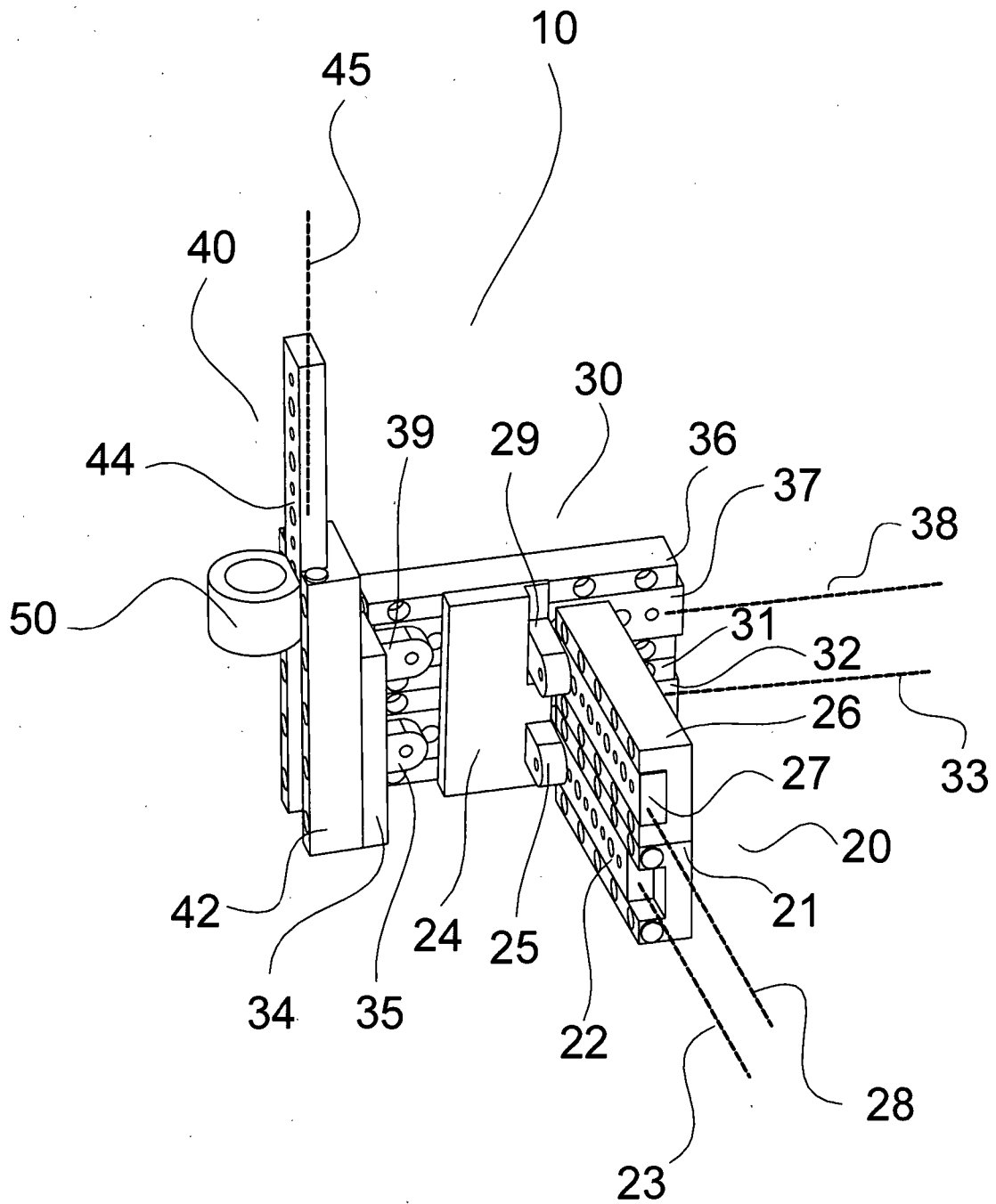


Fig. 2

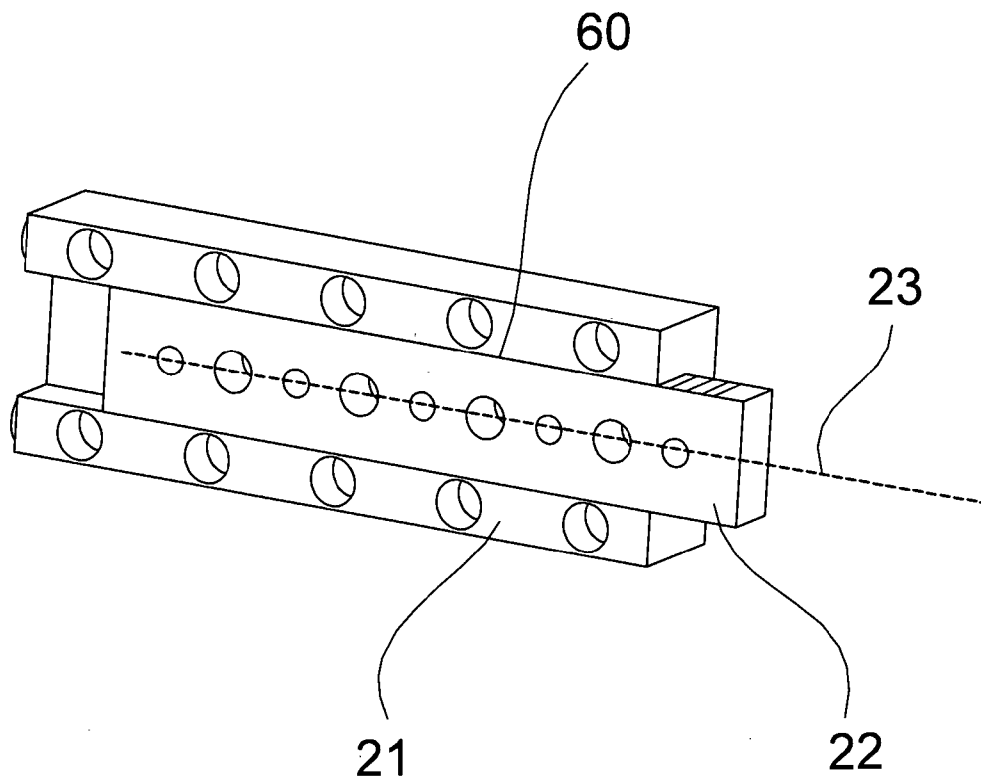


Fig. 3

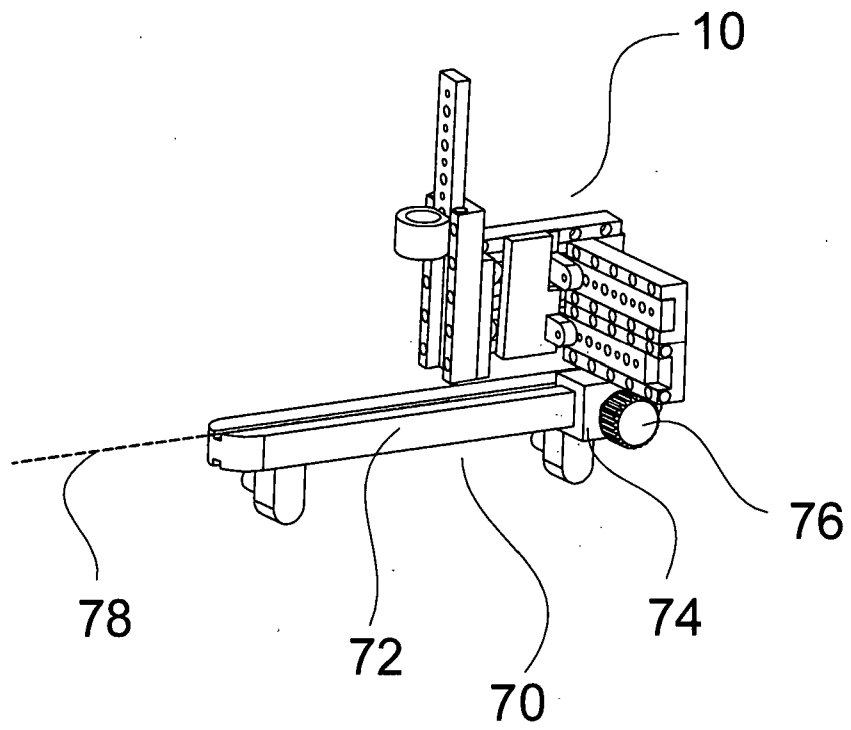


Fig. 4

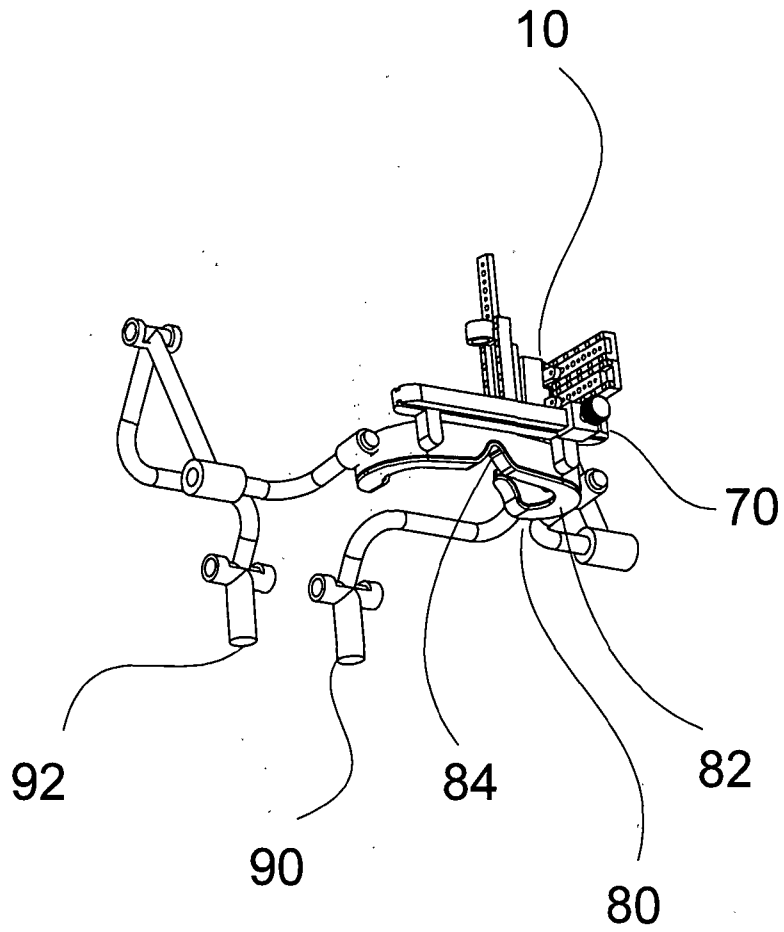


Fig. 5

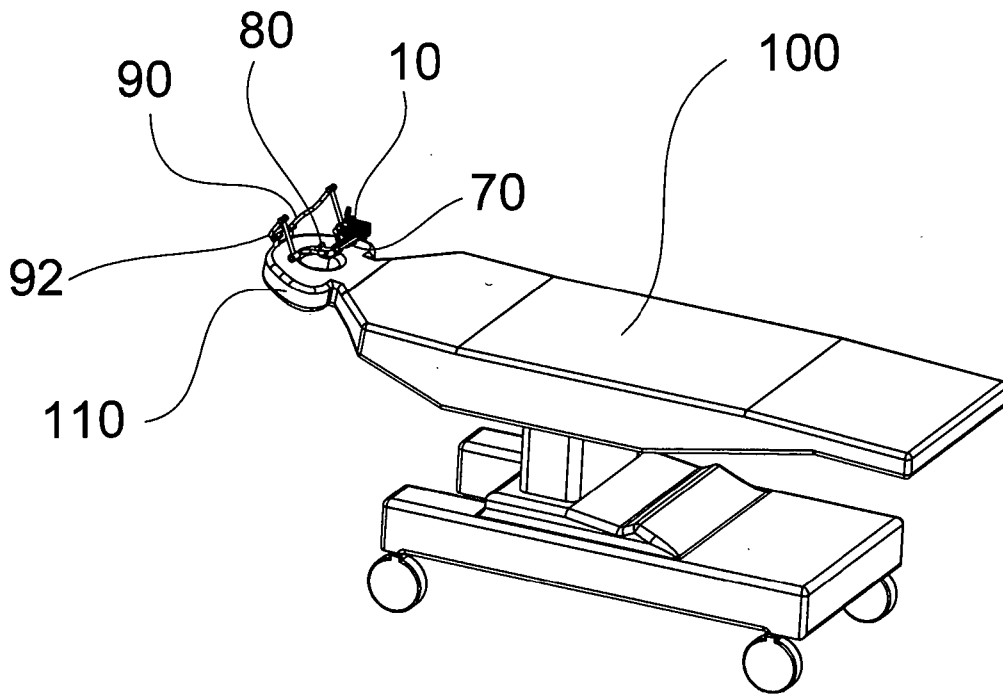


Fig. 6

