

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
21. Juli 2005 (21.07.2005)

PCT

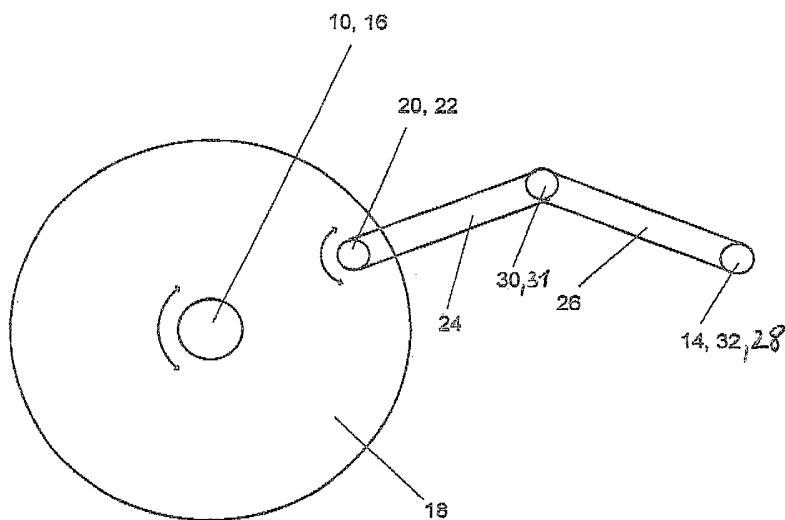
(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2005/065893 A2

- (51) Internationale Patentklassifikation⁷: **B25J 9/00**
- (21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2005/000235
- (22) Internationales Anmeldedatum:
10. Januar 2005 (10.01.2005)
- (25) Einreichungssprache: Deutsch
- (26) Veröffentlichungssprache: Deutsch
- (30) Angaben zur Priorität:
10 2004 001 822.7 8. Januar 2004 (08.01.2004) DE
- (71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): Technische Universität Berlin [DE/DE]; Strasse des 17. Juni 135, 10623 Berlin (DE).
- (72) Erfinder; und
- (75) Erfinder/Anmelder (nur für US): BRETT, Tobias [DE/DE]; Finnländische Str. 13, 10439 Berlin (DE).
- (74) Anwälte: HENGELHAUPT, Jürgen, D. usw.; Anwaltskanzlei, Gulde Hengelhaupt Ziebig & Schneider, Wallstr. 58/59, 10179 Berlin (DE).
- (81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.
- (84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK,

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: ROBOT AND METHOD FOR POSITIONING THE SAME

(54) Bezeichnung: ROBOTER UND VERFAHREN ZUM POSITIONIEREN DESSELBEN



(57) Abstract: The invention relates to a robot and to a method for positioning the same. The aim of the invention is to provide a robot that enables an energetically advantageous and quick execution of pick-and-place tasks. To this end, two, in essence, horizontally arranged robot arms (24, 26) are connected at their ends by means of a small dimensioned rotation pin (30), whereby the second end of the arm (24) is connected to a rotatory drive (22) and is rotationally mounted. The second end of the arm (26) comprises an effector (28). The rotation pin (20) connected to the rotatory drive (22) is connected to a body (18), which is rotationally mounted and which has another rotatory drive (16), whereby both rotation pins (10, 20) are situated at a distance from one another.

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2005/065893 A2



EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, MC, NL,
PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI,
CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.

Veröffentlicht:

— *ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts*

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft einen Roboter und ein Verfahren zum Positionieren desselben. Es ist Aufgabe der vorliegenden Erfindung, einen Roboter anzugeben, welcher eine energetisch günstige und schnelle Abarbeitung von "Pick- and Place"-Aufgaben ermöglicht. Dazu sind zwei im Wesentlichen horizontal angeordnete Roboterarme (24, 26) an ihren Enden mittels einer gering dimensionierten Drehachse (30) verbunden, wobei das zweite Ende des Armes (24) mit einem rotatorischen Antrieb (22) verbunden und drehbar gelagert ist. Das zweite Ende des Armes (26) weist einen Effektor (28) auf. Die mit dem rotatorischen Antrieb (22) verbundene Drehachse (20) ist mit einem Rumpf (18), welcher wiederum drehbar gelagert ist und einen weiteren rotatorischen Antrieb (16) aufweist, verbunden, wobei die beiden Drehachsen (10, 20) voneinander beabstandet angeordnet sind.

Roboter und Verfahren zum Positionieren desselben

Die Erfindung betrifft einen Roboter und ein Verfahren zum Positionieren
5 desselben mit den in den Oberbegriffen der Ansprüche 1 und 13 genannten
Merkmale.

In den unterschiedlichsten industriellen Fertigungsprozessen werden
heutzutage Roboter eingesetzt, welche entsprechend ihrer Anwendung
unterschiedlichste Kinematiken aufweisen. Dabei werden häufig so genannte
10 „Pick- and Place“ - Aufgaben von Robotern übernommen, bei welchen Objekte
vom Roboter an einem Ort ergriffen und an einem anderen Ort abgesetzt
werden müssen. Dabei ist es wünschenswert, die Objekte (Güter) schnell zu
greifen, zu transportieren und unter Einhaltung einer hohen
Positioniergenauigkeit innerhalb möglichst kurzer Zeit am Zielort ablegen zu
15 können. Weiterhin wünschenswert ist es, den Anteil von Leerfahrten des
Roboters so gering wie möglich zu halten. Neben den „Pick- and Place“ -
Aufgaben, für welche dem Roboter regelmäßig Greifelemente zugeordnet
werden, können jedoch auch andere Aufgaben, wie beispielsweise der
Beschuss bestimmter Objekte mit Laserstrahlung, vorgesehen sein. Für solche
20 Aufgaben ist jedoch kein Greifelement, sondern eine Vorrichtung zur Erzeugung
von Laserstrahlung erforderlich. Aus dem vorgenannten ergibt sich, dass der
Roboter je nach Aufgabe mit den zu bearbeitenden Objekten (Gütern) in
unterschiedlicher Weise in Kontakt tritt. Dieses In-Kontakt-Treten mit den
Objekten wird durch den mindestens einen Effektor des Roboters realisiert,
25 welcher beispielsweise ein Laser oder eine Greifvorrichtung sein kann. Ein
Effektor kann aber auch eine sonstige Vorrichtung sein, durch welche der
Roboter auf das zu bearbeitende (oder zu transportierende) Objekt in
geeigneter Weise einwirkt.

Bei dem so genannten SCARA-Roboter, welcher beispielsweise aus US 4,702,668 bekannt ist, werden zur Positionierung des Effektors zwei horizontal operierende Arme, welche drehbeweglich miteinander verbunden sind, verwendet. Dabei ist ein erster Arm an seinem ersten Ende drehbeweglich mit einer Basis und einem rotatorischen Antrieb verbunden, wobei das zweite Ende des ersten Armes drehbeweglich mit einem Ende des zweiten Armes verbunden ist. Die gemeinsame Drehachse der beiden Arme verfügt ebenfalls über einen zweiten rotatorischen Antrieb. Am anderen Ende des zweiten Armes ist der Effektor angeordnet. Mittels der mindestens zwei rotatorischen Antriebe wird der Effektor des Roboters mittels bekannter Methoden, wie beispielsweise „Point-To-Point“, „Synchro-Point-To-Point“ oder „Continuous Path“ positioniert. Durch die bewegten Antriebe, welche für die Aufnahme von hohen Bearbeitungskräften ausgelegt sein müssen, ist das Trägheitsmoment des SCARA-Roboters relativ hoch. Energetisch ungünstig ist der SCARA-Roboter insbesondere bei großen Distanzen mit hohem Bewegungsanteil des Oberarms (erster Arm) aufgrund dessen großer Trägheit, welche vor allem durch die Masse des zweiten rotatorischen Antriebes bedingt ist. Ein Verzicht auf den zweiten rotatorischen Antrieb ist nach dem Konzept des SCARA-Roboters jedoch nicht möglich, da dies dazu führen würde, dass der am zweiten Arm (Unterarm) angeordnete Effektor nicht mehr gezielt positioniert werden könnte.

„Pick- and Place-Aufgaben“ mit verbundener 180° Drehung des gesamten Arms werden beim SCARA-Roboter aufgrund der vorgenannten Nachteile häufig umgangen, indem ein größer dimensionierter SCARA-Roboter gewählt wird, um die zu bedienenden Felder (Feld, aus dem Objekte entnommen und Feld, in das Objekte gestellt werden) direkt nebeneinander setzen zu können. Grundsätzlich wäre jedoch zur Unterbringung zweier beispielsweise quaderförmiger „Pick- and Place“-Felder, wie beispielsweise zwei Transportbänder, eine möglichst punktsymmetrische Anordnung des Roboters zwischen den Feldern vorteilhaft. Dies ist beim SCARA-Roboter jedoch aus den vorgenannten Gründen energetisch nachteilhaft. Um die „Pick- and Place“-Felder nebeneinander anordnen zu können (d.h. die Roboterbasis neben beiden Feldern), muss der SCARA-Roboter größer dimensioniert werden, was einerseits zu einem Kostennachteil, andererseits zu einem ungenutzten Arbeitsbereich von über 50 % führt. Weiterhin wirkt sich die Masse des größeren Roboterarms energetisch nachteilhaft aus.

Aus US 6,275,748 B1 und US 6,593,718 B1 sind Roboter mit 3 starren, beweglich angeordneten Armen bekannt, wobei die 3 Drehachsen, über welche die Arme gehalten werden, jeweils rotatorische Antriebe aufweisen. Insbesondere weisen der erste und der zweite Arm sowie der zweite und der dritte Arm je eine gemeinsame Drehachse auf. Der am Ende des dritten Armes angeordnete Effektor kann ebenfalls mittels bekannter Methoden, wie beispielsweise „Point-To-Point“, „Synchro-Point-To-Point“ oder „Continuous Path“ positioniert werden. Dieses Konzept ähnelt dem des Scara-Roboters, nur das statt der 2 Arme nun 3 Arme vorgesehen sind. Insbesondere ist das Trägheitsmoment und damit die Energieaufnahme (vor allem bei „Pick and Place“ – Aufgaben wegen ständiger Beschleunigungen und Verzögerungen bis zum Stillstand des Effektors) relativ hoch. Energetisch ungünstig sind die in US 6,275,748 B1 und US 6,593,718 B1 vorgeschlagenen Roboter insbesondere bei großen Distanzen mit hohem Bewegungsanteil des Oberarms (erster Arm) aufgrund dessen großer Trägheit, welche vor allem durch die Masse des zweiten rotatorischen und des dritten Antriebes bedingt ist. Ein Verzicht auf den zweiten oder den dritten rotatorischen Antrieb ist jedoch nicht möglich, da dies dazu führen würde, dass der am dritten Arm angeordnete Effektor nicht mehr gezielt positioniert werden könnte.

Um die vorgenannten Nachteile zu beseitigen, ist in N. Scherm „Dynamics and control of underactuated manipulation systems: A discrete time approach“, 34. Regelungstechnisches Kolloquium, Boppard, 2000, zur Verbesserung des Konzept des SCARA-Roboters vorgeschlagen worden, auf den zweiten außerhalb der Grunddrehachse des Roboters angeordneten rotatorischen Antrieb zu verzichten und eine Steuerung des Roboters beziehungsweise eine Positionierung des Effektors des Roboters lediglich mittels des einen rotatorischen Antriebs zu realisieren. Die Vorteile dieser Lösung bestehen vor allem in einem geringeren Trägheitsmoment des ersten Armes (Oberarm) des Roboters, weshalb dieser energetisch vorteilhaft, insbesondere bei häufigen 90°-Drehungen des Oberarmes im Vergleich zum SCARA-Roboter betrieben werden kann. Weitere Vorteile sind geringere Kosten, ein geringeres Gewicht sowie ein geringerer Anteil an Querkräften im Unterarm bei Erreichen der Ruhelage. Die notwendige Positioniergenauigkeit beispielsweise für „Pick- and Place“-Aufgaben konnte jedoch bisher nicht erreicht werden. Die Steuerbarkeit basiert auf schwachen dynamischen Kopplungen wie etwa Zentrifugalkräften. Befindet sich das System in ei-

ner Ruhelage, so kann keine Positionskorrektur vorgenommen werden, da die dynamischen Kopplungen nicht vorhanden sind. Der Einsatz von Bremsen bewirkt hier keine Verbesserung, da diese den Arm zwar fixieren, jedoch hat die Verzögerung der Auslösung das Verfehlen der erwünschten Position zur Folge.

5 Das Fixieren der zweiten außerhalb der Grundachse angeordneten Achse reduziert die Zahl der Freiheitsgrade des Gesamtsystems. Die verbleibenden Freiheitsgrade reichen für eine Positionskorrektur der Abweichungen aus dem Bremsvorgang nicht aus. Zur Nutzung der dynamischen Kopplungen für die Bahnbewegung müssen in der Regel Ausholbewegungen der Arme ausgeführt
10 werden, die zu einer starken Erhöhung der Transportzeiten führen. Aufgrund der vorgenannten Nachteile lassen sich die notwendigen Zykluszeiten, wie sie beispielsweise der SCARA-Roboter erreicht, nicht realisieren.

Weiterhin ist der so genannte Delta-Roboter bekannt, welcher eine hauptsächlich parallele Kinematik und ein relativ geringes Gewicht aufweist, wodurch er
15 extrem kurze Zykluszeiten, welche im Bereich von 0,4 Sek. liegen, erreichen kann. Dieser Delta-Roboter besteht aus einer unbeweglichen Basis, welche an einer Decke montiert wird. Weiterhin weist der Delta-Roboter vier Arme sowie vier (rotatorische) Antriebe auf. Drei Arme, bestehend aus Ober- und Unterarm, verbinden die Basis mit der bewegten Plattform am unteren Ende, welche den
20 Effektor trägt. Die Armgeometrie hält die Plattform dabei stets parallel zur Basis. Die Parallelkinematik der Arme ermöglicht eine hohe Steifigkeit und Beschleunigung. Der vierte Arm dient zur Übertragung eines Drehmoments und ermöglicht eine Rotation des Effektors. Aufgrund der zwingenden Deckenmontage des Delta-Roboters sind seine Einsatzgebiete eingeschränkt. Weiterhin ragen
25 die drei Arme in relativ vielen Arbeitspositionen weit über den Effektor hinaus. Dadurch ist es dem Delta-Roboter nicht möglich, in Arbeitsräume einzudringen, welche lediglich einen seitlichen Zugang aufweisen. Selbst bei Annäherung an eine Seitenwand ist der Delta-Roboter nicht einsetzbar. Dies ist nachteilhaft, da das (seitl.) Entnehmen von Werkstücken aus Maschinen in vielen Montage-
30 oder Bearbeitungsprozessen Verwendung findet, bei dem die Orientierung der Werkstücke einmalig durch einen Roboter bzw. ein Robotersystem sichergestellt wird, um diese definierte örtliche Lage in allen Folgeprozessen beibehalten zu können. Für solche Aufgaben kann der Delta-Roboter aufgrund der vorgenannten Nachteile nicht eingesetzt werden.

Es ist daher Aufgabe der vorliegenden Erfindung, einen Roboter sowie ein Verfahren zum Positionieren des Effektors eines Roboters anzugeben, welches bei „Pick- and Place“ - Aufgaben die vorgenannten Nachteile überwindet. Dabei soll der erfindungsgemäße Roboter eine energetisch günstige und schnelle Abarbeitung von „Pick- and Place“ - Aufgaben realisieren können und weiterhin mittels des erfindungsgemäßen Verfahrens mit einer hohen Genauigkeit positionierbar sein. Neben einer hohen Positioniergenauigkeit und geringen Zykluszeiten soll der erfindungsgemäße Roboter bei „Pick- and Place“ - Aufgaben energetisch vorteilhafter als die Roboter nach dem Stand der Technik einsetzbar sein.

Diese Aufgaben werden durch einen Roboter und ein Verfahren zum Positionieren des Effektors eines Roboters mit den in den Ansprüchen 1 (Roboter) und 13 (Verfahren) genannten Merkmalen im Zusammenwirken mit den Merkmalen im Oberbegriff gelöst.

Ein besonderer Vorteil der Erfindung besteht darin, dass mit dem erfindungsgemäßen Roboter beispielsweise „Pick- and Place“ - Aufgaben besonders schnell, sehr präzise und energetisch vorteilhafter als nach dem Stand der Technik ausgeführt werden können. Dabei liegt der Erfindung die Idee zugrunde, die Nachteile des SCARA-Roboters (hohes Trägheitsmoment) und des unteraktuierten SCARA-Roboters (keine ausreichende Positionierbarkeit, zahlreiche Ausholbewegungen) zu beheben. Dazu wurde das Modell des unteraktuierten SCARA-Roboters weiterentwickelt. Die Idee der Erfindung besteht darin, zwei im Wesentlichen horizontal angeordnete Roboterarme (zweites und drittes starres Element) an ihren Enden mittels einer Drehachse (dritte Drehachse) zu verbinden, welche lediglich einen gering dimensionierten Antrieb (dritter rotatorischer Antrieb) aufweist, wobei das zweite Ende des zweiten Armes mit einem rotatorischen Antrieb (zweiter rotatorischer Antrieb) verbunden und drehbar gelagert (um eine zweite Drehachse) ist. Das zweite Ende des dritten Armes weist einen Effektor auf. Die mit dem zweiten rotatorischen Antrieb verbundene Drehachse (zweite Drehachse) ist mit einem Rumpf (erstes starres Element), welcher wiederum (um eine erste Drehachse) drehbar gelagert ist und einen weiteren (ersten) rotatorischen Antrieb aufweist, verbunden, wobei die beiden Drehachsen (erste und zweite Drehachse) voneinander beabstandet angeordnet sind.

Aufgrund der dritten Achse mit einem gering dimensionierten Antrieb (bzgl. des Nennabtriebsmomentes), welche zwei starre Elemente miteinander verbindet, ist das Trägheitsmoment und damit auch die Energieaufnahme des erfindungsgemäßen Roboters trotz guter Positionierbarkeit deutlich verringert.

5 Wegen des geringer dimensionierten Antriebes (in der dritten Drehachse) werden zur Positionierung des Effektors nicht die bekannten Verfahren wie „Point-To-Point“, „Synchro-Point-To-Point“ oder „Continuous Path“, sondern ein neues, nachfolgend noch näher zu beschreibendes Verfahren verwendet. Kennzeichnend für das erfindungsgemäße Positionierungsverfahren ist, dass

10 während der Zeit, in welcher der Effektor stillstehen soll (beispielsweise zum Ergreifen oder Ablegen eines Objektes) der der Basis nächstgelegene Roboterarm (erstes starres Element) weiterhin im Bewegung bleibt, d.h. eine Rotation um die erste Drehachse mit einer von Null verschiedenen Winkelgeschwindigkeit ausführt. Damit der Effektor trotz der Rotation des

15 ersten starren Elements stillstehen kann, werden das zweite und das dritte starre Element mittels des zweiten rotatorischen Antriebs und gegebenenfalls auch mittels des dritten rotatorischen Antriebs derart bewegt, dass sie die Verschiebung des Ort der zweiten Drehachse (aufgrund der Rotation des ersten starren Elements) kompensieren. Eine solche kompensierende Bewegung kann

20 im Regelfall maximal $1/3$ (also ca. 33,3%) einer Umdrehung des ersten starren Elements andauern. Diese Zeit reicht jedoch regelmäßig aus, um beispielsweise „Pick and Place“ – Aufgaben des Roboters an einem Objekt (z.B. das Ergreifen oder das Ablegen eines Objektes) zu realisieren. Der Hauptvorteil besteht in einer Energieersparnis aufgrund des geringer

25 dimensionierten Antriebs in der dritten Achse sowie darin, dass die kinetische Energie des Systems (aufgrund der Vermeidung des Stillstandes der Arme – d.h. zumindest des ersten und zweiten starren Elements) nicht vollständig verloren geht. So ist es möglich, die (während des Ergreifens eines Objektes) in den Armen des Roboters gespeicherte kinetische Energie zum Beschleunigen

30 des (ergriffenen) Objektes und Effektors zu verwenden. Eine geringere Dimensionierung des Antriebs in der dritten Achse kann deshalb erfolgen, weil die Roboterarme (erstes und zweites starres Element) zum Ergreifen oder Ablegen eines Objektes (und damit zum Stillstand des Effektors) selbst nicht bis zum Stillstand abgebremst und daher nachfolgend zum Transport des Objektes

35 nicht aus dem Stillstand heraus beschleunigt werden müssen. Daher sind die in der dritten Drehachse benötigten Kräfte deutlich geringer, so dass der in der

dritten Drehachse angeordnete rotatorische Antrieb bzgl. seines Nennabtriebsmomentes deutlich geringer dimensioniert werden kann.

Diejenige Bewegung, bei welcher der Effektor stillsteht, obwohl der Arm (3 starre Elemente) in Bewegung sind, soll nachfolgend als Nullraumbewegung
5 bezeichnet werden. Diejenige Bewegung, bei welcher der Effektor bewegt wird, soll nachfolgend als Transportbewegung bezeichnet werden.

Der erfindungsgemäße Roboter weist nach der Erfindung mindestens einen linearen Vertikaltrieb und eine Basis auf, welche eine erste, vertikal angeordnete Drehachse mit einem ersten rotatorischen Antrieb aufweist,
10 wobei die erste Drehachse fest mit einem ersten starren, im Wesentlichen horizontal angeordneten Element verbunden ist, welches drehbeweglich über eine zweite, vertikal angeordnete Drehachse mit einem zweiten, im Wesentlichen horizontal angeordneten starren Element verbunden ist, wobei die zweite Drehachse von der ersten Drehachse
15 beabstandet angeordnet ist und einen zweiten rotatorischen Antrieb aufweist und das zweite starre Element über eine dritte Drehachse drehbeweglich mit einem dritten, im Wesentlichen horizontal angeordneten starren Element verbunden ist, wobei die dritte Drehachse von der zweiten Drehachse beabstandet angeordnet ist und einen dritten rotatorischen
20 Antrieb aufweist und das dritte starre Element mit einem Effektor verbunden ist und der mindestens eine lineare Vertikaltrieb mit der Basis, dem Effektor oder einer der Drehachsen verbunden ist, wobei der dritte rotatorische Antrieb ein Nennabtriebsmoment kleiner oder gleich 50% des Nennabtriebsmoment des zweiten rotatorischen Antriebs aufweist.

25

In einer bevorzugten Ausführungsvariante der Erfindung weist der dritte rotatorische Antrieb ein Nennabtriebsmoment kleiner oder gleich 25% des Nennabtriebsmoment des zweiten rotatorischen Antriebs auf. In einer besonders bevorzugten Ausführungsvariante der Erfindung genügt

30 das Nennabtriebsmoment des dritten rotatorischen Antriebs der Bedingung

$$M_3 \leq \frac{6 \cdot \pi \cdot r \cdot l \cdot m}{t^2}$$

wobei r die Länge der Strecke vom Effektormittelpunkt zum Schwerpunkt ist, welcher durch das dritte starre Element, einen gegebenenfalls vorhandenen Vertikaltrieb, den Effektor sowie die Traglast definiert wird, und l die Länge
5 des dritten starren Elements, m die Masse eines gegebenenfalls vorhandenen Vertikaltriebs, des Effektor sowie der gegebenenfalls vorhandenen Traglast und t maximale Zeit zur Ausführung einer Nullraumbewegung ist. Unter Gewicht des Effektors sollen auch das Gewicht einer gegebenenfalls am Effektor angeordneten Hubeinheit (vertikaler Lineartrieb) sowie einer
10 gegebenenfalls vorhandenen Achse für die Rotation des Effektors berücksichtigt werden.

In einer weiteren bevorzugten Ausführungsvariante der Erfindung (in der zwei
15 Roboterarme mit je 3 starren Elementen vorgesehen sind, wobei in einer bevorzugten Ausführungsvariante der Erfindung die beiden ersten starren Elemente durch eine fest mit dem ersten Antrieb verbundene starre Scheibe ausgebildet sind) ist das erste starre Element über eine vierte vertikal
angeordnete Drehachse mit einem vierten, im Wesentlichen horizontal angeordneten starren Element drehbeweglich verbunden, wobei die vierte
20 Drehachse einen vierten rotatorischen Antrieb und den gleichen Abstand von der ersten Drehachse wie die zweite Drehachse aufweist und in Bezug auf die erste Drehachse gegenüber der zweiten Drehachse angeordnet ist und das vierte starre Element über eine fünfte Drehachse
drehbeweglich mit einem fünften, im Wesentlichen horizontal angeordneten starren
25 Element verbunden ist, die fünfte Drehachse einen fünften rotatorischen Antrieb aufweist und das dritte starre Element und das fünfte starre Element jeweils mit einem Effektor verbunden sind und das zweite Element die gleiche Länge wie das vierte Element und das dritte Element die gleiche Länge wie das fünfte Element aufweisen und das
30 Nennabtriebsmoment des dritten rotatorischen Antriebs dem Nennabtriebsmoment des fünften rotatorischen Antriebs entspricht oder im Wesentlichen entspricht.

In einer bevorzugten Ausführungsvariante weist jeder Effektor einen rotatorischen Antrieb und einen linearen Vertikaltrieb auf. Alternativ kann der mindestens eine lineare Vertikaltrieb jedoch auch mit der Basis oder einer der anderen Drehachsen, vorzugsweise der ersten Drehachse, verbunden sein.

5 Das Grundmodell weist daher fünf Antriebe, nämlich einen Antrieb, welcher das erste starre Element mit der Basis verbindet, einen Antrieb zwischen erstem starren und zweitem starren Element, einen gering dimensionierten Antrieb zwischen zweitem starren und drittem starren Element und zwei Antriebe für den Effektor auf. Das erweiterte Modell mit zwei Roboterarmen weist, sofern
10 jeder Effektor einen rotatorischen und linearen Vertikaltrieb aufweist, insgesamt neun Antriebe auf, nämlich den Antrieb zwischen Basis und erstem starren Element, die zwei Antriebe zwischen erstem starren Element und zweitem bzw. viertem starren Element sowie den Antrieb (gering dimensioniert) zwischen zweitem Element und drittem Element sowie den Antrieb (gering
15 dimensioniert) zwischen viertem Element und fünftem Element sowie die vier Antriebe für die zwei Effektoren.

In einer alternativen, bevorzugten Ausführungsvariante weisen alle Antriebe beziehungsweise die mit diesen Antrieben verbundenen Drehachsen und Hubachsen Bremsen auf.

20 Das Verhalten des erfindungsgemäßen Roboters ist insbesondere für „Pick-and Place“ - Aufgaben sehr gut geeignet. Die Positionierung des mindestens einen Effektors des Roboters wird nachfolgend beschrieben:

Die Positionierung des Effektors lässt sich in zwei Kategorien unterteilen, zum einen in die Nullraumbewegung, bei welcher der Effektor stillsteht, obwohl das
25 erste starre Element des Roboters in Bewegung ist (rotiert) und zum anderen die Transportbewegung, bei welcher der Effektor bewegt wird.

Zuerst wird die Nullraumbewegung näher beschrieben. Grundsätzlich sind für die Positionierung in einer Ebene lediglich zwei Achsen mit jeweils einem rotatorischen Freiheitsgrad in dieser Ebene erforderlich. Dabei lässt sich für
30 jede Koordinate in der Ebene maximal zwei mögliche Winkelstellung der beiden Achsen zuordnen. Verfügt der Roboter über drei Achsen in dieser Ebene, so lassen sich einer Koordinate sehr viele mögliche Winkelstellungen der Achsen zuordnen. Dies ist vergleichbar mit einer Hängebrücke, die an beiden Enden

unbeweglich ist, aber die Einzelnen Elemente dazwischen dennoch bewegt werden können. Genauso wie die Hängebrücke kann auch der Roboterarm zwischen seiner festen Basis und dem Effektor, der im Raum stillstehen soll, eine Bewegung des Arms ausführen. Der Unterschied besteht darin, dass bei
5 der Hängebrücke der Stillstand der beiden Enden Voraussetzung ist und beim Roboter der Stillstand des frei im Raum stehenden Effektors das Ziel darstellt.

Für das Verständnis der Abläufe bei der Nullraumbewegung ist die Betrachtung des dritten starren Elements besonders relevant. Damit der Effektor, also das
10 Ende des dritten starren Elements im Raum still steht, ist es erforderlich, dass sich das dritte starre Element auf einer Kreisbahn (Teilkreis) um den Effektor bewegt. Diese Bewegung (der dritten Drehachse auf einem Kreisbogen um den ruhenden Effektor) kann bei gleich bleibender Geschwindigkeit (also konstante Winkelgeschwindigkeit) erfolgen, oder es kann eine Beschleunigung auftreten,
15 welche der Richtung der Geschwindigkeit gleichgerichtet, oder entgegengesetzt ist (Bremsvorgang). Rotiert ein Körper mit konstanter Geschwindigkeit, so wirkt auf diesen nur eine Zentripetalkraft. Diese zeigt in radialer Richtung vom Drehmittelpunkt weg und wirkt somit längs des dritten starren Elements. Eine Kraft, die entlang einem länglichen Körper wirkt, wird Normalkraft genannt. Eine
20 quer wirkende Kraft heißt Querkraft. Die dritte Achse ist am zur Basis näher gelegenen Ende des dritten starren Elements angeordnet; der Kraftvektor der Zentripetalkraft zeigt darum durch diese Achse hindurch. Aus diesem Grund ist es möglich, die Wirkung der Zentripetalkraft durch eine betragsmäßig gleiche Kraft zu neutralisieren, die an der dritten Achse anliegt und der Zentripetalkraft
25 entgegengerichtet ist. Die dritte Drehachse besitzt einen rotatorischen Freiheitsgrad. Translatorisch ist die Achse jedoch bestimmt. Dies hat zur Folge, dass keine Momente vom zweiten in das dritte starre Element übertragen werden können. Das Abtriebsmoment des dritten Antriebs ist zudem gering. Kräfte können jedoch aufgrund der translatorischen Bestimmtheit der dritten
30 Achse über diese in das dritte starre Element eingeleitet werden. Bei einer gleichförmigen Rotation des dritten starren Elements um den Effektor muss lediglich eine Kraft zum Ausgleich der Zentripetalkraft in das dritte starre Element über die dritte Achse eingeleitet werden. Diese Kraft kann nur durch die Leistung des ersten und zweiten Antriebs über die translatorische
35 Bestimmtheit der dritten Achse in das dritte starre Element eingeleitet werden. Der dritte Antrieb hingegen kann lediglich ein Moment im dritten starren

Element erzeugen. Für die Steuerung der Nullraumbewegung bei gleichförmiger Rotation des dritten starren Elements um den Effektor wird der dritte Antrieb also nicht benötigt.

- 5 Die Nullraumbewegung mit beschleunigter Drehbewegung des dritten starren Elements um den Effektor ähnelt der gleichförmigen Bewegung; es kommen jedoch zusätzliche Kräfte für die (rotatorische) Beschleunigung hinzu. Am einfachsten lässt sich die (rotatorische) Beschleunigung erzeugen, in dem ein Moment am Effektor angelegt wird; dies ist jedoch wegen der vorliegenden
- 10 Aufgabenstellung nicht möglich. Kräfte oder Momente müssen durch die dritte Achse übertragen werden. Durch eine Kräftezerlegung ist es möglich, eine Kraft in mehrere Teilkräfte zu zerlegen, wobei die Teilkräfte die gleiche Wirkung hervorrufen. Es ist jedoch nicht möglich, ein Moment, das am Effektor anliegen sollte, allein durch Kräfte (also ohne Momente), die an der dritten Achse
- 15 anliegen, zu ersetzen. Dazu ist eine Kombination von Kraft und Moment in der dritten Achse notwendig. Das benötigte Moment in der dritten Achse kann nur durch den (dritten – gering dimensionierten) Antrieb in dieser (dritten) Achse erzeugt werden. Für die Steuerung der Nullraumbewegung bei beschleunigter Rotation des dritten starren Elements um den Effektor (bzw. dessen
- 20 Mittelpunkt) ist darum der dritte Antrieb nicht ersetzbar. Vorteilhafterweise liegt der gemeinsame Schwerpunkt von drittem starren Element, Effektor und einer Hubachse am Effektor sehr dicht am Effektor. Dadurch wird begünstigt, dass das benötigte Abtriebsmoment des dritten Antriebs gering bleiben kann. Die Beschleunigung des dritten starren Elements durch eine Kraft an der dritten
- 25 Achse erzeugt eine Rotation des starren Elements, deren Zentrum nicht im Mittelpunkt des Effektors liegt, sondern in der Nähe des genannten Massenschwerpunktes_[TB4]. Die Entfernung des unerwünschten Drehmittelpunkts zum Mittelpunkt des Effektors ist jedoch gering. Dadurch ist auf die Positionsabweichung des Effektors von seiner eigentlichen Ruhelage
- 30 ebenfalls gering. Diese geringe Abweichung muss durch den dritten Antrieb ausgeglichen werden, sowie durch eine Kraft, die ihren Ursprung ebenfalls in der dritten Achse hat. Bei der Steuerung der Nullraumbewegung mit beschleunigtem drittem starrem Element (beschleunigte Rotation des dritten starren Elements um den Effektor) ist also lediglich ein geringes
- 35 Abtriebsmoment erforderlich, weswegen der dritte rotatorische Antrieb gering dimensioniert werden kann.

Neben der oben genannten Einleitung eines Momentes für die Nullraumbewegung bei beschleunigter Rotation des dritten starren Elements um den Effektor wird der dritte Antrieb weiterhin für die Regelung während der (später noch detaillierter beschriebenen) Transportbewegung benötigt.

5 Grundsätzlich wird für die Transportbewegung, d.h. die Steuerung des Roboters von einem Ausgangspunkt zu einem Zielpunkt vom Controller eine passende Bahnbewegung des Roboterarms errechnet. Dazu liegen Informationen über den mechanischen Aufbau des Arms, die Winkelstellung der Achsen im Ausgangspunkt und die Koordinaten des Zielpunktes vor. Aus diesen

10 Informationen werden die Verläufe der benötigten Motormomente (des ersten und zweiten Antriebes) über die Zeit vorausbestimmt. Wird nun der entsprechende Strom zur Erzeugung des gewünschten Momentenverlaufes in die Antriebe (erster und zweiter Antrieb) eingeleitet, so bewegt sich der Roboter entsprechend der berechneten Bahn. In der Praxis treten jedoch eine ganze

15 Reihe von Störgrößen auf, die den Roboter bei der Transportbewegung von seinem Kurs abbringen und das Verfehlen des Zielpunktes bewirken. Darunter fallen die Reibung, Materialnachgiebigkeit, Lagerspiel und thermische Ausdehnungen. Darum verfügt ein Roboter über einen Regelkreis. Dieser misst permanent die erforderlichen Prozessgrößen wie Winkelstellungen und –

20 geschwindigkeiten der Achsen. Die Abweichungen während der Bewegung werden an die Steuerung weitergeleitet, die umgehend eine Anpassung bzw. Bahnkorrektur vornehmen kann. Bei der Bahnberechnung durch die Steuerung wird nun stets eine Leistungsreserve der Antriebe (erster und zweiter Antrieb) berücksichtigt. Diese Leistungsreserven können während der Bahnbewegung

25 dank des Regelkreises für die Bahnkorrektur verwendet werden. Die dritte Achse ist nun mit einem derart leistungsschwachen Antrieb ausgestattet, dass er für die Bahnplanung (bei der Transportbewegung) von vernachlässigbarer Bedeutung ist. Sein Leistungsbeitrag für die Beschleunigung des Roboters (bei der Transportbewegung) und damit auch sein Beitrag zu einer kurzen

30 Zykluszeit des Roboters ist vernachlässigbar. Für die erste Berechnung der Bahn durch die Steuerung kann der dritte Antrieb darum unberücksichtigt bleiben. Da jedoch auch in der dritten Achse Störeinflüsse auftreten muss ein Antrieb für die Regelung vorhanden sein, der es erlaubt diese störenden Momente und Kräfte in der dritten Achse auszugleichen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der dritte Antrieb bei der Transportbewegung lediglich zur Kompensation von Störeinflüssen und bei der Nullraumbewegung (lediglich im Falle einer beschleunigten Rotation der dritten Drehachse um den Effektor) für das Einleiten eines Momentes benötigt wird, wodurch der dritte Antrieb vorteilhafterweise sehr gering dimensioniert werden kann. Da die Nullraumbewegung zeitlich kürzer als die Transportbewegung ist (die Einsatzzeit des dritten Antriebs für die Steuerung liegt daher insgesamt unter 50%), kann der dritte Antrieb in der kurzen Nutzungsphase wesentlich über das Nenndrehmoment des Herstellers hinaus belastet werden. Die mögliche Drehmomenterhöhung liegt im Bereich von 25 bis 50% über dem Nenndrehmoments. Dies führt ebenfalls dazu, dass der dritte Antrieb gering dimensioniert werden kann.

Nachfolgend soll die Transportbewegung näher beschrieben werden. Grundsätzlich sind sehr viele, unterschiedliche Transportbewegungen möglich. Entscheidend für die Auswahl der Bewegung ist die Dimensionierung des Roboters, sowie das Ende der Nullraumbewegung. Abhängig davon, ob das zweite und das dritte starre Element nach innen, Richtung erste Drehachse einklappt (nachfolgend auch als Innenschwung bezeichnet), oder nach außen, von der ersten Drehachse weg (nachfolgend auch als Außenschwung bezeichnet), muss eine unterschiedliche Bewegung gewählt werden.

Zunächst soll die Innenschwung-Bewegung näher erläutert werden. Unabdingbar ist zu Beginn der Transportbewegung (also nach einer Nullraumbewegung, denn Transportbewegung und Nullraumbewegung wechseln sich stets ab) eine schnelle Einklappbewegung des zweiten und dritten starren Elements in Richtung der ersten Drehachse. Die zweite Drehachse bringt dazu zunächst ihre maximale Leistung auf, um die Einklappbewegung zu beschleunigen. Durch die Impulseinleitung während der Übergangsphase von der Nullraumbewegung erhält der Effektor eine starke Beschleunigung in Richtung der zweiten Achse. Der Geschwindigkeitsanteil in dieser Richtung ist darum im Effektor sehr stark. Zu Beginn der Einklappbewegung erhöht der zweite Antrieb den Geschwindigkeitsanteil des Effektors in dieser Richtung sehr stark. Der Effektor bewegt sich bereits nach wenigen Augenblicken wesentlich schneller als die zweite Achse. Der Effektor nähert sich somit rasch der zweiten Achse. Je weiter das zweite und das dritte

starre Element eingeklappt werden, desto mehr bewirkt die Momenteinleitung des zweiten Antriebs eine Kraftübertragung in den Effektor, die zu einer Beschleunigung in Richtung erster Drehachse führt. Darum wird die Momenteinleitung der zweiten Achse schnell auf Null reduziert. Die Bewegung des Effektors wird nun etwas von seiner geradlinigen Bahn abgebracht, in Richtung erster Drehachse. Da sich die zweite Drehachse ebenfalls auf einer Kreisbahn (Kreisbogen) um die erste Drehachse befindet, wird dadurch der Effektor jedoch eher weiter in Richtung der neuen Position der zweiten Drehachse ausgerichtet. Es zeigt sich jedoch, dass die Krümmung der Bahn des Effektors stärker ist, als die der Bahn der zweiten Drehachse. Somit wird der Effektor nicht direkt unter der zweiten Drehachse hindurchschwingen, sondern ein wenig in Richtung der ersten Drehachse versetzt. Dies wird bei der Dimensionierung des Roboters berücksichtigt, in dem das dritte starre Element vorzugsweise kürzer als das zweite starre Element ist. Bei der Bewegung wird dies weiterhin dadurch berücksichtigt, dass zum Zeitpunkt, zu dem sich der Effektor zwischen zweiter und erster Drehachse befindet, die dritte Drehachse bereits in Bewegungsrichtung der zweiten Drehachse wesentlich weiter nach vorne bewegt wurde. Hierzu sind keine besonderen Steuerungsmaßnahmen erforderlich. Der Schwung aus der Anfangsphase der Bewegung reicht aus, sofern die Antriebsleitung vom zweiten Antrieb richtig gewählt wird. Die Bewegung setzt sich fort, bis sich der Effektor und die dritte Drehachse auf der Linie des Geschwindigkeitsvektors der zweiten Drehachse zu diesem Zeitpunkt befinden (Dies ist die Tangentiale durch die zweite Drehachse zu diesem Zeitpunkt). Der Effektor hat somit die zweite Drehachse überholt; das zweite und das dritte starre Element liegen übereinander. Die Winkelstellung beträgt circa 180° (gemäß Definition). Der Effektor kann sich in dieser Position nicht weiter nach vorne von der zweiten Drehachse entfernen, da die Position der starren Elemente zwei und drei in dieser Richtung eine Hemmung verursachen. Der Geschwindigkeitsanteil des Effektors, der in Längsrichtung der starren Elemente zwei und drei zeigt, wird vollständig von einer Normalkraft aufgenommen, die durch die Hemmung in den starren Elementen entsteht und der Bewegungsrichtung entgegenwirkt. Diese Gegenkraft hat sich bereits vor der 180° Stellung allmählich aufgebaut. Dabei hat sie bereits eine Abbremsung bewirkt, und die Richtung der Bewegung des Effektors derart umgeleitet, dass sich der Effektor nicht mehr der ersten Achse annähert, sondern sich leicht von dieser entfernt. Während der 0° -Stellung bleibt diese

Geschwindigkeitskomponente erhalten, da sie nicht von der Hemmung beeinflusst wird. Die Geschwindigkeit der zweiten Drehachse muss durch die Leistung des zweiten Antriebs so weit reduziert werden, dass sich Effektor und dritte Achse auf einer Kreisbahn (Kreisbogen) um die zweite Drehachse mit nahezu gleicher Geschwindigkeit bewegen. Die 180° Stellung der dritten Drehachse bleibt dabei in etwa erhalten. Erst wenn die dritte Drehachse in Richtung der Bewegung der zweiten Drehachse hinter dieser angelangt ist, wird ersichtlich, dass die Drehgeschwindigkeit des Effektors um die zweite Drehachse ein wenig größer war, als die der dritten Drehachse und die 180°-Stellung der dritten Drehachse allmählich verlassen wurde. Der Effektor hat somit das zweite starre Element überholt, sein Geschwindigkeitsvektor zeigt nun in Richtung der ersten Drehachse. Die zweite Drehachse wird zu diesem Zeitpunkt erneut durch den zweiten Antrieb beschleunigt. Dies bewirkt auch eine Beschleunigung des Effektors. Hauptsächlich jedoch hat dieser Vorgang eine Bahnabweichung des Effektors zur Folge, deren Auswirkung zunimmt, je weiter der Winkel an der dritten Drehachse betragsmäßig in den Bereich von 90° abfällt. Die Abweichung erfolgt in Richtung der Bewegung der zweiten Drehachse. Die Leistung des zweiten Antriebs muss dabei so gewählt werden, dass der Effektor zunehmend in Richtung auf die Zielkoordinate ausgerichtet wird. Nun wird ein Zeitpunkt für die Leistungsumkehr des zweiten Antriebs gewählt, der ein Abbremsen des Effektors bewirkt. Abhängig davon, wie rasch der Roboter die 180°-Stellung der dritten Drehachse verlassen hat, der richtigen Steuerung der Beschleunigungsphase der zweiten Drehachse sowie der Abbremsphase, erreicht der Roboter den Zielpunkt in genau der Art und Weise, wie es für die Einleitung einer Nullraumbewegung erforderlich ist. Die Voraussetzungen für die Einleitung einer Nullraumbewegung aus der Transportbewegung bzw. die Voraussetzungen für die Einleitung einer Transportbewegung aus der Nullraumbewegung heraus werden später noch näher erläutert.

30

Nachfolgend soll die Außenschwung-Bewegung näher erläutert werden. Diese Bewegung ist geringfügig langsamer als die Innenschwung-Bewegung. Einsetzbar ist sie, wenn die Nullraumbewegung endet, in dem das zweite und dritte starre Element in Richtung von der ersten Drehachse weg einknicken. Hierbei ist der Beginn dieser Transportbewegung entscheidend. Die Antriebsleistung des zweiten Antriebs, die in den ersten Augenblicken zur

35

Verfügung steht ist maßgeblich für die Transportzeit verantwortlich. Darum wird der Motor vorzugsweise für die erste Zeit (im Bereich einiger ersten hundertstel Sekunden) über seine Nennleistung hinaus bis an seine Leistungsgrenze belastet werden. Das Motormoment wirkt in der Anfangsphase der Einknickbewegung unterstützend, also in Richtung der Winkelbewegung der zweiten Drehachse. Dabei wird die Beschleunigung des Effektors in Richtung der zweiten Drehachse erhöht. Zusätzlich kommt eine geringe Geschwindigkeitskomponente hinzu, die eine Bahnabweichung des Effektors in Richtung von der ersten Drehachse weg zur Folge hat. Diese Abweichung steigt mit zunehmender Annäherung des Effektors an die zweite Drehachse an, da das zweite und dritte starre Element immer weiter eingeklappt werden und sie ist unerwünscht. Darum wird das Abtriebsmoment rasch reduziert. Nachteilig wirkt sich ebenfalls die Kreisbahn (Kreisbogen) der zweiten Drehachse aus. Deren Krümmung verläuft in die entgegengesetzte Richtung als die Krümmung der Effektorbahn. Somit findet zwar eine Annäherung des Effektors an die zweite Drehachse statt; die Bahnen werden sich jedoch nicht überschneiden. Es müssen zusätzliche Maßnahmen ergriffen werden, damit sich der Effektor nicht auf eine Bahn bewegt, die zu weit von der zweiten Drehachse entfernt ist. Das dritte starre Element ist vorzugsweise nur wenig kürzer als das zweite, in einer bevorzugten Ausführungsvarianten beträgt die Länge des dritten starren Elements zwischen 90% und 100% der Länge des zweiten starren Elements. In der 180°-Stellung der dritten Drehachse muss der Effektor also sehr dicht an die zweite Drehachse heranbewegt werden. Dazu wird wie beschrieben das Antriebsmoment kurz nach Beginn der Transportbewegung wieder abgeschaltet. Gegebenenfalls muss die Wirkrichtung der Antriebsleistung von Antrieb zwei sogar umgekehrt werden und die Winkelgeschwindigkeit der zweiten Drehachse reduzieren. Dadurch wird die Bahnbewegung der dritten Drehachse verlangsamt und bewegt sich nicht so rasch wie der Effektor. Je schneller die 0°-Stellung der dritten Drehachse dadurch erreicht wird, desto geringer fällt die für die 0°-Stellung unerwünschte Abweichung der Bahn der zweiten Achse von einer gedachten geradlinigen Bewegung aus. Bei dieser Transportbewegung wird die 180°-Stellung der dritten Drehachse vom dritten starren Element möglichst rasch durchlaufen. Die Winkelgeschwindigkeit der dritten Drehachse soll darum zum Zeitpunkt der 180°-Stellung möglichst hoch sein. Der Effektor schwingt unter dem starren Element hindurch. Sobald die dritte Drehachse um circa 15°

ausgeschlagen ist, beginnt die Momenteinleitung des zweiten Antriebs erneut und beschleunigt die Winkelgeschwindigkeit der zweiten Drehachse. Diese bewegt sich immer noch in Drehrichtung der ersten Drehachse. Der Beginn der Momenteinleitung und der Betrag der Leistung müssen hier genau berechnet sein, da hier ein sensibler Bereich der Bewegung vorliegt. Bereits eine kleine Momentänderung hat einen großen Einfluss auf die Position der zu beginnenden Nullraumbewegung. Die Momenteinleitung muss so gewählt werden, dass der Effektor nicht mehr unter das zweite starre Element gelangt, sondern seine Distanz rasch ausbaut. Weiterhin muss sich die Bahn des Effektors zunehmend einem geraden Verlauf annähern, mit Richtung auf die Zielkoordinate. Anschließend kann der Übergang zur Nullraumbewegung erfolgen, da sich die dritte Achse der 0°-Stellung (das heißt 0° zwischen zweitem starren Element und drittem starren Element) annähert.

Nachfolgend sollen gemeinsame Merkmale für den Übergang von der Transport- zur Nullraumbewegung erläutert werden.

Während der Transportbewegung befindet sich der gesamte Roboterarm (d.h. alle starren Elemente) in einer schnellen Bewegung. Beim Übergang zur Nullraumbewegung soll die Bewegungsenergie des Roboterarms erhalten bleiben, das bedeutet, der Arm soll auch während der Nullraumbewegung weiterbewegt werden. Wichtig ist die Betrachtung des Effektors. Dieser muss bei dem Übergang möglichst rasch von einer hohen Geschwindigkeit in eine vollständige Ruheposition auf einer im Voraus berechneten Koordinate kommen. Unabhängig von der Art der Transportbewegung, die davor ausgeführt wurde, und der Koordinate, die angefahren werden soll, weisen alle Übergänge bestimmte Merkmale auf, die es ermöglichen, einen raschen Stillstand des Effektors zu gewährleisten:

1. Für den Moment der Übergangsphase kommen für die dritte Drehachse nur zwei Winkelstellungen in Frage. Dies ist zum Einen die vollständige Streckung von zweitem zu drittem starrem Element. Die Distanz von Effektor zu zweiter Achse ist maximal. Diese Stellung von zweiter und dritter Achse soll als 0°-Stellung verstanden werden. Zum Anderen die Winkelstellung der dritten Achse in Betracht, bei der das zweite und dritte starre Element genau übereinander liegen. Diese Stellung von zweiter und dritter Achse soll als 180°-Stellung verstanden werden. Die Distanz von

Effektor zu zweiter Drehachse ist hier minimal. Zweites und drittes starres Element sind in beiden Winkelstellungen gleich ausgerichtet (die Längsrichtungen stimmen überein).

2. Der Bremsvorgang beruht weiterhin darauf, dass der Geschwindigkeitsvektor des Effektors im Augenblick der Bremsphase entlang dem zweiten und dritten starren Element zeigt. Die Bremskraft zeigt dadurch ebenfalls längs der beiden starren Elemente; es handelt sich darum um eine Normalkraft in den starren Elementen zwei und drei. Diese Normalkraft kann in Form einer Zug- oder Druckkraft auftreten. Diese sind sehr vorteilhaft für die Konstruktion des Roboters, da Normalkräfte im Gegensatz zu Querkräften von den Gliedern eines Roboters sehr gut aufgenommen werden können, ohne dass eine spezielle Versteifung erforderlich ist.

3. Entsprechend (1.) und (2.) entsteht durch das Abbremsen des Effektors lediglich eine Normalkraft in zweitem und drittem starren Element. Diese kann in Form einer Zug- oder Druckkraft auftreten. Diese Kräfte haben jedoch bei den Winkelstellungen 0° und 180° keinen Einfluss auf die dritte Drehachse, da sie lediglich translatorisch wirken können, die dritte Drehachse aber keinen translatorischen Freiheitsgrad aufweist. Der Effektor wird somit daran gehindert, die Distanz zu der zweiten Drehachse zu erhöhen.

4. Für eine noch detailliertere Beschreibung der Bewegung des Arms muss eine Unterscheidung zwischen den beiden Armstellungen erfolgen:

4.1. Damit der Arm die 0° -Stellung der dritten Drehachse unter Berücksichtigung der genannten Voraussetzungen erreicht, muss sich der Effektor während der Transportbewegung in der Nähe der zweiten Drehachse befinden. Die dritte Drehachse muss dazu sehr weit eingeklappt sein, im Bereich von betragsmäßig mindestens circa 150° . Weiterhin besitzt der Effektor einen Geschwindigkeitsvektor, der von der zweiten Drehachse wegzeigt. Wäre der Effektor eine punktförmige Masse und das zweite und dritte starre Element masselos, so würde der Effektor eine geradlinige Bahnbewegung ausführen, entlang dem Geschwindigkeitsvektor. Das zweite und dritte starre Element würde solche Stellungen einnehmen, welche die geradlinige Bahn des Effektors begünstigen, da dieser der massebehaftete Körper ist. Dieses Verhalten, welches auch die Winkelbewegungen der zweiten und dritten Drehachse bestimmt,

würde so lange fortgesetzt, bis die maximale Reichweite von zweitem und drittem starrem Element erreicht wäre. Dies ist bei der 0° Stellung der dritten Drehachse der Fall. Die entfernende Bewegung des Effektors von der zweiten Drehachse endet umgehend. Die zweite und dritte Drehachse besitzen zum Zeitpunkt der 0° Stellung eine hohe Winkelgeschwindigkeit. Die Achsen schwingen somit durch. Die entfernende Bewegung des Effektors wird umgekehrt, es kommt zu einer Verkürzung der Distanz von zweiter Drehachse zu Effektor. Diese Verkürzung ist vorteilhaft. Die zweite Drehachse bewegt sich mit der Umfangsgeschwindigkeit des ersten starren Elements. Diese Bewegung ist zum Zeitpunkt des Beginns der Nullraumbewegung derart gerichtet, dass sich die Distanz zu der Zielcoordinate des Effektors verringert, während sie sich gegen Ende der Nullraumbewegung wieder erhöht. Aus diesem Grunde ist es vorteilhaft, dass sich die Distanz von Effektor und zweiter Drehachse ebenfalls wie beschrieben zu Beginn der Nullraumbewegung verringert und die Annäherung der zweiten Achse an die Zielcoordinate kompensiert. Dazu muss die Annäherungsgeschwindigkeit von Effektor zu zweiter Drehachse genau auf die Annäherungsbewegung von zweiter Drehachse zur Zielcoordinate abgestimmt sein. In der Realität besitzen das zweite und das dritte starre Element eine Masse, die nicht vernachlässigbar ist, aber im Verhältnis zur Masse des Effektors gering ist. Diese Masse erweist sich als Störgröße bei der geradlinigen Entfernungsbewegung des Effektors von der zweiten Drehachse und bei der Annäherungsbewegung. Weiterhin muss während der Entfernungsbewegung die Geschwindigkeit des Effektors so weit reduziert werden, dass die darauf folgende Annäherungsbewegung exakt mit der Annäherungsbewegung der zweiten Drehachse zum Effektor übereinstimmt. Dies wird während der Annäherungsbewegung durch ein Abbremsen der Winkelgeschwindigkeit der zweiten Drehachse durch den zweiten Antrieb erreicht. Dadurch wird jedoch die geradlinige Bahn des Effektors ebenfalls gestört. Diese Störelemente führen zu einer Krümmung der geradlinigen Bahn des Effektors. Es ist nun Aufgabe der Steuerung, diese Elemente bei der Bahnplanung zu berücksichtigen, so dass der Geschwindigkeitsvektor bei Erreichen der 0° Stellung dennoch in Längsrichtung der starren Elemente zwei und drei zeigt. Es ist mög-

lich, diese Elemente derart zu beeinflussen, dass der Effektor genau über der Zielkoordinate zum Stillstand kommt.

- 4.2. Bei der zweiten Nullraumbewegung erfolgt der Übergang von der Transportbewegung prinzipiell bei einer 180° Stellung der dritten Drehachse. Merkmal dieser Nullraumbewegung ist ihre lange Dauer. Außerdem ist der Effektor für bei nicht überall im Arbeitsraum positioniert werden. Aus diesen beiden Gründen ist es vorteilhaft, einen Kompromiss einzugehen. Der Effektor könnte dabei nicht vollständig zum Stillstand kommen. Er könnte mit einer geringeren Geschwindigkeit an Position verbracht werden, die er ansonsten nicht einnehmen könnte und dort auf irgend eine Art und Weise gestoppt werden.

Nachfolgend sollen gemeinsame Merkmale für den Übergang von der Nullraum- zur Transportbewegung erläutert werden.

Das Ende der Nullraumbewegung bildet die Grundlage für eine neue Transportbewegung. Zu diesem Zeitpunkt ist das zweite und dritte starre Element vollständig gestreckt, die dritte Drehachse befindet sich also in der 0°-Stellung. Eine weitere Entfernung der zweiten Drehachse vom Effektor ist nicht möglich. Somit wird der Effektor umgehend beschleunigt. Die Impulseinleitung in den Effektor führt in etwa zu einer Geschwindigkeit, welche der Geschwindigkeit der zweiten Drehachse entspricht. Außerdem befinden sich die starren Elemente zwei und drei in Bewegung. Die zweite Drehachse rotiert dazu im umgekehrten Drehsinn gegenüber der dritten Drehachse. Dies führt zu einer Verkürzung der Distanz von Effektor zu zweiter Drehachse und somit zu einer weiteren Beschleunigung des Effektors. Die Drehrichtung des dritten starren Elements ändert sich in der Regel während der Nullraumbewegung. Darum endet jede Nullraumbewegung mit einem anderen Drehsinn der dritten Drehachse. Entsprechend muss eine geeignete Transportbewegung gewählt werden, die als Anschlussbewegung geeignet ist.

Bisher ist die Positionierung des Effektors auf einen ruhenden vordefinierten Ort (Zielkoordinate) vorgenommen worden. Natürlich ist es auch ohne Weiteres möglich, das vorgenannte Positionierungsverfahren auf einen bewegte Zielkoordinate zu applizieren. In diesem Fall ist es vorgesehen, die Geschwindigkeitskomponenten des vordefinierten Ortes (der Zielkoordinate) additiv auf den Roboter zu übertragen.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass das Verfahren zum Positionieren eines Effektors eines Roboters an einen vordefinierten Ort für ein vorgegebenes Zeitintervall (Nullraumbewegung) durch:

- 5 - Verbringen des Effektors an den vordefinierten Ort zu Beginn des Zeitintervalls, wobei die zweite Drehachse und die dritte Drehachse mittels des ersten und des zweiten rotatorischen Antriebs derart ausgerichtet werden, dass sich die zweite Drehachse, die dritte Drehachse und der Effektor zu Beginn des Zeitintervalls auf einer
10 Geraden befinden und das um die erste Drehachse rotierende erste starre Element zu Beginn des Zeitintervalls eine von Null verschiedene Winkelgeschwindigkeit aufweist,
- 15 - Beaufschlagung des ersten starren Elements während des Zeitintervalls mittels des ersten rotatorischen Antriebs derart, dass der Betrag der Winkelgeschwindigkeit des ersten starren Elements während des Zeitintervalls stets größer als Null ist und
- 20 - Beaufschlagung des zweiten und des dritten starren Elements während des Zeitintervalls mittels des ersten und zweiten rotatorischen Antriebs und gegebenenfalls auch mittels des dritten rotatorischen Antriebs derart, dass sich die dritte Drehachse während des Zeitintervalls auf einem Kreisbogen um den vordefinierten Ort bewegt und der Effektor
25 trotz der Rotation des ersten starren Elements um die erste Drehachse während des Zeitintervalls am vordefinierten Ort verweilt

gekennzeichnet ist. Vorzugsweise wird derjenige Teil des Effektors am vordefinierten Ort für das vorgegebene Zeitintervall positioniert wird, welcher mit einem zu bearbeitenden Werkstück in Kontakt tritt.

30

Grundsätzlich bedarf ein im Ruhezustand befindlicher Roboter (alle starren Elemente stehen still) einer Startbewegung, die entweder in eine Transportbewegung oder in eine Nullraumbewegung übergeht. Hier kommen unterschiedlichste Bewegungsabläufe in Betracht, wobei nachfolgend eine bevorzugte Ausführungsvariante einer Startbewegung beschrieben werden soll, die in eine Transportbewegung übergeht.

35

Befindet sich der Roboter in einem vollständigen Ruhezustand (alle starren Elemente stehen still), erfolgt zunächst die Ausrichtung des zweiten starren Elements durch den zweiten Antrieb in Richtung der ersten Drehachse (diese Ausrichtung soll nachfolgend als 0°-Position der zweiten Drehachse verstanden werden). Anschließend folgt die Beschleunigung der ersten Drehachse, bis diese ihre vorgesehene konstante Drehgeschwindigkeit erreicht hat. Die zweite Drehachse behält dabei die 0°-Stellung bei, in dem der zweite Antrieb ein entsprechendes (kompensierendes) Moment aufbringt. Während diesen Vorgängen bewegt sich das dritte starre Element undefiniert in der durch die dritte Drehachse definierte Ebene. Bei ansteigender Drehgeschwindigkeit der ersten Drehachse wirkt eine ansteigende Zentrifugalkraft auf das dritte starre Element, so dass dieses sich allmählich entlang des zweiten starren Elements in Richtung der zweiten Drehachse ausrichtet (0°-Stellung der dritten Drehachse). Die erste Drehachse führt nun die vorgesehene konstante Drehbewegung mit definierter Winkelgeschwindigkeit aus. Die Drehachse zwei und drei befinden sich jeweils in der 0°-Stellung. Die zweite Drehachse wird nun durch den zweiten Antrieb stark entgegen dem Drehsinn der ersten Drehachse beschleunigt. Durch die Drehbewegung der zweiten Drehachse ist das dritte starre Element nicht mehr längs der Kraftwirkung der Zentrifugalkraft im Effektor ausgerichtet. Dies bewirkt, dass sich der Effektor immer weiter von der ersten Drehachse entfernt. Die Beschleunigung der zweiten Drehachse muss darum so hoch sein, dass die zweite Drehachse die 180°-Stellung durchläuft, bevor der Effektor sich so weit von der ersten Drehachse entfernt hat, dass die dritte Drehachse zu diesem Zeitpunkt um mehr als 70° die 0°-Stellung in Drehrichtung der ersten Drehachse verlassen hat. Dies ist erforderlich, damit die Drehbewegung der zweiten Drehachse nicht zu einer weiteren Entfernung des Effektors von der ersten Drehachse führt. Die Drehung der zweiten Drehachse muss hierbei von dem zweiten Antrieb so beschleunigt, bzw. abgebremst werden, dass die zweite Drehachse eine $\frac{3}{4}$ Umdrehung ausgeführt hat und zum gleichen Zeitpunkt die dritte Drehachse die 180°-Stellung durchläuft, als auch der Effektor zu diesem Zeitpunkt vollständig translatorisch zur Ruhe kommt. An diese Bewegung kann nun eine wie oben beschriebene Innenschwungbewegung ansetzen; ein Impuls wird bei diesem Startvorgang aus dem ersten starren Element in den Effektor ebenfalls übertragen.

Die Erfindung wird nachfolgend anhand von Ausführungsbeispielen näher erläutert. Es zeigen:

- Figur 1 eine Aufsicht eines erfindungsgemäßen Roboters mit drei starren Elementen in schematischer Darstellung,
- 5 Figur 2 eine schematische Schnittdarstellung eines erfindungsgemäßen Roboters mit drei starren Elementen,
- Figur 3 eine Aufsicht eines erfindungsgemäßen Roboters mit fünf starren Elementen in schematischer Darstellung und
- 10 Fig. 4-17 eine schematische Darstellung des erfindungsgemäßen Positionierungsverfahrens mit unterschiedlichen Stellungen der starren Elemente während einer Transport- und während einer Nullraumbewegung, im einzelnen:
- Figur 4 eine schematische Darstellung der einzelnen Stellungen der starren Elemente zu Beginn einer Innenschwung-Bewegung (Transportbewegung) in Aufsicht,
- 15 Fig. 5-11 schematische Darstellungen unterschiedlicher Stellungen der starren Elemente während der Innenschwung-Bewegung in Aufsicht,
- Fig. 12 eine schematische Darstellung der einzelnen Stellungen der starren Elemente zum Ende der Innenschwung-Bewegung und damit zu Beginn einer sich an diese Transportbewegung anschließende Nullraumbewegung in Aufsicht,
- 20 Fig. 13-16 schematische Darstellungen unterschiedlicher Stellungen der starren Elemente während der Nullraumbewegung in Aufsicht und
- 25 Fig. 17 eine schematische Darstellung der einzelnen Stellungen der starren Elemente zum Ende der Nullraumbewegung in Aufsicht.

Die Figuren 1 und 2 zeigen das Grundmodell eines erfindungsgemäßen Roboters in der Aufsicht und in der Schnittdarstellung. Der Roboter ist über die Basis 12 mit einem festen Gegenstand, beispielsweise einer Unterlage, verbunden. Dabei ist es jedoch nicht zwingend notwendig, dass der Roboter auf einer Unterlage steht. Ebenso kann der erfindungsgemäße Roboter auch

30

hängend an einer Decke montiert werden. Die Basis 12 weist eine erste Drehachse 10 mit einem ersten rotatorischen Antrieb 16, vorzugsweise einem Elektromotor, auf. Mit dem ersten rotatorischen Antrieb 16 ist das erste starre Element 18, welches als kreisrunde Rumpfscheibe ausgebildet ist, fest verbunden. Dabei ist die Drehachse 10 mit dem rotatorischen Antrieb 16 im Mittelpunkt des kreisförmigen starren Elementes 18 angeordnet. Am seitlichen Rand (Peripherie) des starren Elementes 18 ist die zweite Drehachse 20 mit einem zweiten rotatorischen Antrieb 22, welcher durch einen Elektromotor ausgebildet wird, angeordnet. Das starre Element 18 ist voll umfänglich um die Drehachse 10 drehbar gelagert. Über die Drehachse 20 ist das erste starre Element 18 mit dem zweiten starren Element 24 (Oberarm), welches den ersten beweglichen Roboterarm ausbildet, verbunden. Über die dritte Drehachse 30 ist das zweite starre Element mit dem dritten starren Element (Unterarm), welches den zweiten Roboterarm ausbildet, verbunden. Die dritte Drehachse 30 weist einen gering dimensionierten dritten rotatorischen Antrieb 31 auf, dessen Nennabtriebsmoment M_3 im Ausführungsbeispiels lediglich 20% des Nennabtriebsmomentes M_2 des zweiten rotatorischen Antriebs 22 beträgt. Dadurch weist der dritten rotatorischen Antrieb 31 lediglich ein Gewicht auf, welches ca. 10% des Gewichtes des zweiten rotatorischen Antriebes 22 beträgt.

Am Unterarm 26 des Roboters ist der Effektor 28 angeordnet, welcher im Ausführungsbeispiel als Greifer ausgeführt ist. Der Effektor 28 ist mit einem Vertikaltrieb 14 und über eine Drehachse 32 mit einem rotatorischen Antrieb 36 verbunden. Alle drei Drehachsen 10, 20, 30 sind in diesem Ausführungsbeispiel vollumfänglich drehbar gelagert, d.h. dass eine beliebige Zahl von Umdrehungen ausgeführt werden kann, ohne dass stromzuführende Kabel überdreht werden und abreißen. Ebenfalls ist die Drehachse 32 zur Drehung des Effektors 28 vollumfänglich drehbar gelagert. Eine vollumfängliche Drehbarkeit kann nach dem Stand der Technik auf unterschiedliche Weise realisiert werden. Beispielsweise können Schlauchdurchführungen mit Lagerung und Dichtung für die Pneumatikschläuche zum Effektor eingesetzt werden. Die Übertragung der Stromleitungen an den betreffenden Achsen kann beispielsweise durch Schleifringe oder induktiv oder in einer anderen geeigneten Weise gelöst werden.

Grundsätzlich ist eine vollumfängliche Drehbarkeit der genannten Achse 10, 20, 30 nicht zwingend notwendig, um die erfindungsgemäße Nullraumbewegung (d.h. ein in Ruhe befindlicher Effektor 28 trotz in Rotation befindlicher Drehachse 10) zu realisieren, jedoch wäre es in diesem Fall notwendig, jeweils nach einer Transport- und Nullraumbewegung den Roboter (also alle 3 starren Elemente 18, 24, 26) vollständig zum Stillstand zu bringen und im Anschluss eine Bewegung mit entgegen gesetztem Drehsinn der Drehachse 10, zum Beispiel genau die vorherige Bewegung rückwärts, auszuführen. Dies hat den Nachteil längerer Zykluszeiten. Vorteilhaft in einer solchen Variante ist jedoch, dass während des vollständigen Stillstands des Roboters eine Greifzeit zur Verfügung steht, die beliebig über die Zeit der Nullraumbewegung hinausgeht, was in einigen Applikationen vorteilhaft sein kann.

Vorteilhafterweise ist das Trägheitsmoment der Arme (Elemente 24 und 26) aufgrund des gering dimensionierten rotatorischen Antriebs 31 in der Drehachse 30 deutlich geringer. Hierdurch werden wesentlich kürzere Zykluszeiten möglich. Entgegen dem SCARA-Roboter zeigt sich der Geschwindigkeitsvorteil vor allem auf weiten Bewegungen durch den Arbeitsraum.

Figur 3 zeigt eine bevorzugte Ausführungsvariante eines erfindungsgemäßen Roboters mit zwei Roboterarmen (je Oberarm und Unterarm). Dazu weist das erste starre Element 18 eine vierte Drehachse 40 auf, welche mit einem rotatorischen Antrieb 42 verbunden ist. Über die Drehachse 40 ist das vierte starre Element 44 (zweiter Oberarm) mit dem ersten starren Element 18 verbunden. Weiterhin ist das vierte starre Element 44 mit dem fünften starren Element 46 (zweiter Unterarm) über Drehachse 50 verbunden, welche einen gering dimensionierten fünften rotatorischen Antrieb 51 aufweist, dessen Nennabtriebsmoment M_5 im Ausführungsbeispiels lediglich 20% des Nennabtriebsmomentes M_4 des vierten rotatorischen Antriebs 42 beträgt.

Am Ende des fünften starren Elementes 46 ist ein zweiter Effektor 28 angeordnet, welcher über eine Drehachse 32 mit einem rotatorischen Antrieb 36 und über einen linearen Vertikaltrieb 14 verfügt. In dieser Ausgestaltung weist der erfindungsgemäße Roboter zwei Arme (bestehend aus den Elementen 24 und 26 beziehungsweise 44 und 46) auf, wobei die Antriebe 31, 51 der Drehachsen 30 und 50 erfindungsgemäß gering im Vergleich zu den

Antriebe 22, 42 (und natürlich auch zum ersten rotatorischen Antrieb 16) ausgebildet sind. Aufgrund der gegenüberliegenden Anordnung der Drehachsen 20 und 40 ist eine Kollision der Arme nahezu ausgeschlossen, da Fliehkräfte des drehenden starren Elementes 18 einer Annäherung der Arme entgegenwirken. Weiterhin kann durch eine abgestimmte Taktung der Greifbewegungen aufgrund ähnlicher Nullraumbewegungen die Verweilzeit in Kollisionsgefährdeten Bereichen einfach geplant werden. Vorzugsweise sind alle Drehachsen 10, 20, 30, 40, 50 vollumfänglich drehbar gelagert.

Hierin besteht ein weiterer Vorteil gegenüber dem SCARA-Roboter, welcher nur über einen Roboterarm verfügt. Aufgrund der großen Kollisionsgefahr werden SCARA-Roboter auch nur selten im gleichen Arbeitsraum eingesetzt, denn es besteht Kollisionsgefahr aufgrund eines Steuerfehlers, welcher mit dem erfindungsgemäßen Roboter mit zwei Armen nahezu ausgeschlossen ist. Ein Einsatz des erfindungsgemäßen Roboters mit zwei Armen ist insbesondere in Situationen vorteilhaft, in welchen in sehr kurzer Zeit eine Anlage be- oder entladen werden muss, weshalb aufgrund der vorgenannten Kollisionsproblematik des SCARA-Roboters selten zwei Roboter eingesetzt werden können.

Ein weiterer Vorteil des erfindungsgemäßen Roboters ist sein geringer Hub, wodurch die Bauhöhe am Lastpunkt relativ gering ist, so dass der Arm auch in Arbeitsräume mit sehr geringer Höhe seitlich eindringen kann. Weiterhin geht die kinetische Energie des Systems nicht bei jeder Ruhelage des Effektors verloren, da wie bereits vorgeschrieben, das (massenmäßig größte) erste starre Element während der „Pick- and Place“-Aufgaben auch in der Ruhephase des Effektors 28 weiterdreht, während die beiden starren Elemente 24 und 26 diese Drehbewegung kompensieren. Weiterhin vorteilhaft ist es, dass für die zwei Arme in dem Ausführungsbeispiel nach Figur 3 lediglich eine Steuerung notwendig wird. Im Vergleich zum vorbeschriebenen Scara Roboter weist der erfindungsgemäße Roboter deutlich kürzere Zykluszeiten auf. Weiterhin vorteilhaft ist es, dass sich der Effektor 28 des erfindungsgemäßen Roboters einer Wand seitlich nähern kann, was aufgrund der Geometrie des Delta-Roboters nicht möglich ist. Weiterhin kann der erfindungsgemäße Roboter sowohl an der Decke als auch auf einer Vorrichtung am Boden montiert werden.

Die Figuren 4-17 zeigen eine schematische Darstellung des erfindungsgemäßen Positionierungsverfahrens eines Roboters des Grundmodells (Figuren 1 und 2) mit unterschiedlichen Stellungen der starren Elemente 18, 24, 26 während einer Transport- (Fig. 4-12) und während einer Nullraumbewegung (Fig. 12-17). Der Schwerpunkt 37 ist genau genommen der Schwerpunkt, welcher durch das erste starre Element 18 und denjenigen Teil des ersten rotatorischen Antriebs 16 gebildet wird, welcher während der Rotation des ersten starren Elements 18 ebenfalls bewegt wird. Der Schwerpunkt 38 ist genau genommen der Schwerpunkt, welcher durch das zweite starre Element 24 und diejenigen Teile des zweiten rotatorischen Antriebs 22 und des dritten rotatorischen Antriebs 31 gebildet werden, welche während der Rotation des zweiten starren Elements 24 ebenfalls bewegt werden. Der Schwerpunkt 39 ist derjenige Schwerpunkt, welcher durch das dritte starre Element 26, einen gegebenenfalls vorhandenen Vertikaltrieb 14, den Effektor 28, eine ggf. vorhandene Traglast und denjenigen Teil des dritten rotatorischen Antriebs 31 gebildet wird, welcher während der Rotation des dritten starren Elements 26 ebenfalls bewegt wird.

In Figur 4 liegen die Voraussetzungen für den Beginn einer Transportbewegung (Innenschwung-Bewegung) vor, da sich das zweite starre Element 24, das zweite starre Element 26 und der Effektor 28 auf einer Linie (Geraden) befinden. Wie der Roboter in diese Position gebracht wird, wurde bereits (siehe Beschreibung der Startbewegung oder Nullraumbewegung, an die sich die Transportbewegung anschließt) ausführlich erläutert.

Zunächst erfolgt eine schnelle Einklappbewegung (Fig. 5 und 6) des zweiten und dritten starren Elements 24, 26, also der dritten Drehachse 30 in Richtung der ersten Drehachse 10. Die zweite Drehachse 20, d.h. der zweite rotatorische Antrieb 22 bringt dazu zunächst seine maximale Leistung auf, um die Einklappbewegung zu beschleunigen. Durch eine vorhandene Impulseinleitung vom ersten starren Element 18 in den Effektor 28, während der Übergangsphase von der Nullraumbewegung (oder während Übergangsphase von der Startbewegung) erhält der Effektor 28 eine starke Beschleunigung in Richtung der zweiten Achse 20. Der Geschwindigkeitsanteil in dieser Richtung ist darum im Effektor 28 sehr stark. Zu Beginn der Einklappbewegung (Fig. 5) erhöht der zweite Antrieb 22 den Geschwindigkeitsanteil des Effektors 28 in

dieser Richtung sehr stark. Der Effektor 28 bewegt sich bereits nach wenigen Augenblicken wesentlich schneller als die zweite Achse 20. Der Effektor 28 nähert sich somit rasch der zweiten Achse 20 (Fig. 5-7). Je weiter das zweite und das dritte starre Element 24, 26 eingeklappt werden, desto mehr bewirkt die Momenteinleitung des zweiten Antriebs 22 eine Kraftübertragung in den Effektor 28, die zu einer Beschleunigung in Richtung erster Drehachse 10 (Fig. 5 und 6) führt. Darum wird die Momenteinleitung der zweiten Achse 20 schnell auf Null reduziert. Die Bewegung des Effektors 28 wird nun etwas von seiner geradlinigen Bahn abgebracht, in Richtung erster Drehachse 10.

Die Bewegung setzt sich fort, bis sich der Effektor 28 und die dritte Drehachse 30 im Wesentlichen auf der Linie des Geschwindigkeitsvektors der zweiten Drehachse 20 zu diesem Zeitpunkt befinden (Dies ist die Tangentiale durch die zweite Drehachse 20 zu diesem Zeitpunkt). Der Effektor 28 hat somit die zweite Drehachse 20 überholt (Fig. 7 und 8); das zweite und das dritte starre Element 24, 26 liegen übereinander (Fig. 8). Die Winkelstellung beträgt circa 180° (gemäß Definition). Der Effektor 28 kann sich in dieser Position nicht weiter nach vorne von der zweiten Drehachse 20 entfernen, da die Position der starren Elemente 24, 26 (zwei und drei) in dieser Richtung eine Hemmung verursachen. Der Geschwindigkeitsanteil des Effektors 28, der in Längsrichtung der starren Elemente 24, 26 (zwei und drei) zeigt, wird vollständig von einer Normalkraft aufgenommen, die durch die Hemmung in den starren Elementen 24, 26 entsteht und der Bewegungsrichtung entgegenwirkt. Der übrige Geschwindigkeitsanteil des Effektors 28 wirkt quer zum dritten starren Element. Bleibt die 180° Stellung der dritten Achse 30 durch entsprechende Korrekturmaßnahmen des zweiten Antriebs 22 erhalten, so führen der Effektor 28 und die dritte Achse 30 eine Rotationsbewegung um die zweite Achse 20 aus. Bei dieser Rotation soll die Winkeldrehung des Effektors 28 etwas schneller als die der dritten Achse 30 verlaufen. Dabei verlässt die dritte Achse 30 allmählich ihre 180° Stellung

Nach ausreichend großer Auslenkung des Effektors 28 von der (Teil-)Kreisbahn um die zweite Achse 22 wird nun die zweite Drehachse 20 erneut durch den zweiten Antrieb 22 beschleunigt (Fig. 9). Hauptsächlich hat dieser Vorgang eine verlangsamte Auslenkung der dritten Achse 30 zur Folge, sowie eine Beschleunigung des Effektors 28, deren Auswirkung zunimmt, je weiter der Winkel an der dritten Drehachse 30 betragsmäßig in den Bereich von 90°

abfällt. Die Abweichung erfolgt in Richtung der Bewegung der zweiten Drehachse 20. Die Leistung des zweiten Antriebs 22 muss dabei so gewählt werden, dass der Effektor 28 zunehmend in Richtung auf die Zielcoordinate (= vordefinierter Ort P1) ausgerichtet wird. Nun wird ein Zeitpunkt für die
5 Leistungsumkehr des zweiten Antriebs 22 gewählt, der ein Abbremsen des Effektors 28 bewirkt. Abhängig davon, wie rasch der Roboter die 180°-Stellung der dritten Drehachse 30 verlassen hat (Fig. 9-11), und abhängig von der richtigen Steuerung der Beschleunigungsphase der zweiten Drehachse 20 sowie der Abbremsphase, erreicht der Roboter den Zielpunkt (P1), siehe Fig.
10 12, in genau der Art und Weise, wie es für die Einleitung einer Nullraumbewegung erforderlich ist.

Nun wird (Fig. 12) die Nullraumbewegung eingeleitet. Damit der Effektor 28, also das Ende des dritten starren Elements 26 im Raum (und zwar bei P1) für ein Zeitintervall Δt still steht, ist es erforderlich, dass sich das dritte starre
15 Element 26 auf einer Kreisbahn (=Teilkreis, Kreisbogen) um den Effektor 28 bewegt. Diese Bewegung (der dritten Drehachse 30 auf einem Kreisbogen um den an P1 ruhenden Effektor 28) erfolgt im Ausführungsbeispiel zunächst in die der Basis 12 abgewandte Richtung (Fig. 13, 14) und nachfolgend in die der Basis 12 zugewandte Richtung (Fig. 15, 16), wobei die dritte Drehachse 30
20 dann noch weiter dreht (Fig. 17) und sich somit der Abstand zwischen Basis 12 und Drehachse 30 wieder erhöht. Insofern handelt es sich um eine nicht gleichförmige rotatorische Bewegung der dritten Drehachse 30 auf einem Kreisbogen um den an P1 ruhenden Effektor 28 mit einem Umkehrpunkt (Fig. 14). Vorteilhafterweise liegt der gemeinsame Schwerpunkt von drittem starren
25 Element 26, Effektor 28 und einer Hubachse am Effektor 28 sehr dicht am Effektor 28. Dadurch wird begünstigt, dass das benötigte Abtriebsmoment des dritten Antriebs 31 gering bleiben kann. Die Beschleunigung des dritten starren Elements 26 durch eine Kraft an der dritten Achse 30 erzeugt eine Rotation des starren Elements 26, deren Zentrum nicht im Mittelpunkt des Effektors 28 liegt,
30 sondern in der Nähe des Massenschwerpunktes.

Nachfolgend werden über den zweiten Antrieb 22 und den dritten Antrieb 31 solche Momente bzw. Kräfte in das dritte starre Element 26 eingeleitet, dass sich sowohl die dritte Drehachse 30 auf einer Kreisbahn um P1 als auch der Effektor 28 in Ruhe am Punkt P1 befinden, während sich das erste starre
35 Element mit konstanter Winkelgeschwindigkeit im Zeitintervall Δt weiterdreht.

Insofern kompensieren die Elemente 24, 26 die rotatorische Bewegung des Elementes 18 im Punkt P1, welcher daher während des gesamten Zeitintervalls Δt (Fig. 12-17) in Ruhe ist. Vorteilhafterweise sind die hierfür benötigten Momente des dritten Antriebes 31 derart, dass dieser dritte Antrieb 31 sehr gering dimensioniert werden kann. Dies führt zu einem geringeren Trägheitsmoment des Armes (24, 26) und damit zu geringeren Zykluszeiten und einer geringeren Energieaufnahme.

Neben der oben genannten Einleitung eines Momentes für die Nullraumbewegung (bei beschleunigter Rotation des dritten starren Elements 26 um den Effektor 28) wird der dritte Antrieb 31 auch für die Regelung während der Transportbewegung (Fig. 4-12) benötigt. Grundsätzlich wird für die Transportbewegung, d.h. die Steuerung des Roboters von einem Ausgangspunkt zu einem Zielpunkt (P1) vom Controller eine passende Bahnbewegung des Roboterarms errechnet. Dazu liegen Informationen über den mechanischen Aufbau des Arms (24, 26), die Winkelstellung der Achsen (10, 20, 30) im Ausgangspunkt und die Koordinaten des Zielpunktes (P1) vor. Aus diesen Informationen werden die Verläufe der benötigten Motormomente (des ersten und zweiten Antriebes 16, 22) über die Zeit vorausbestimmt. Wird nun der entsprechende Strom zur Erzeugung des gewünschten Momentenverlaufes in die Antriebe (erster und zweiter Antrieb 16, 22) eingeleitet, so bewegt sich der Roboter entsprechend der berechneten Bahn. In der Praxis treten jedoch eine ganze Reihe von Störgrößen auf, die den Roboter bei der Transportbewegung von seinem Kurs abbringen und das Verfehlen des Zielpunktes bewirken. Darunter fallen die Reibung, Materialnachgiebigkeit, Lagerspiel und thermische Ausdehnungen. Darum verfügt ein Roboter über einen Regelkreis. Dieser misst permanent die erforderlichen Prozessgrößen wie Winkelstellungen und -geschwindigkeiten der Achsen 10, 20, 30. Die Abweichungen während der Bewegung werden an die Steuerung weitergeleitet, die umgehend eine Anpassung bzw. Bahnkorrektur vornehmen kann. Bei der Bahnberechnung durch die Steuerung wird nun stets eine Leistungsreserve der Antriebe (erster und zweiter Antrieb 16, 22) berücksichtigt. Diese Leistungsreserven können während der Bahnbewegung dank des Regelkreises für die Bahnkorrektur verwendet werden. Die dritte Achse 20 ist nun mit einem derart leistungsschwachen Antrieb ausgestattet, dass er für die Bahnplanung (bei der Transportbewegung) von vernachlässigbarer Bedeutung ist. Sein

Leistungsbeitrag für die Beschleunigung des Roboters (bei der Transportbewegung) und damit auch sein Beitrag zu einer kurzen Zykluszeit des Roboters ist vernachlässigbar. Für die erste Berechnung der Bahn durch die Steuerung kann der dritte Antrieb 31 darum unberücksichtigt bleiben. Da
5 jedoch auch in der dritten Achse 30 Störeinflüsse auftreten muss der Antrieb 31 für die Regelung verfügbar sein, der es erlaubt, diese störenden Momente und Kräfte in der dritten Achse 30 auszugleichen.

Bezugszeichenliste

	10	erste Drehachse
	12	Basis
	14	Vertikalantrieb
5	16	erster rotatorischer Antrieb
	18	erstes starres Element
	20	zweite Drehachse
	22	zweiter rotatorischer Antrieb
	24	zweites starres Element/Oberarm
10	26	drittes starres Element/Unterarm
	28	Effektor
	30	dritte Drehachse
	31	dritter rotatorischer Antrieb
	32	Drehachse des Effektors
15	36	rotatorischer Antrieb für Effektor
	37	Schwerpunkt des ersten starren Elements
	38	Schwerpunkt des zweiten starren Elements
	39	Schwerpunkt des dritten starren Elements
	40	vierte Drehachse
20	42	vierter rotatorischer Antrieb
	44	viertes starres Element/Oberarm
	46	fünftes starres Element/Unterarm
	50	fünfte Drehachse

	51	fünfter rotatorischer Antrieb
	t1	Zeitpunkt des Beginns der Nullraumbewegung
	Δt	Zeitintervall der Nullraumbewegung
	P1	vordefinierter Ort
5	M ₂	Nennabtriebsmoment des zweiten rotatorischen Antriebs 22
	M ₃	Nennabtriebsmoment des zweiten rotatorischen Antriebs 31
	M ₄	Nennabtriebsmoment des zweiten rotatorischen Antriebs 42
	M ₅	Nennabtriebsmoment des zweiten rotatorischen Antriebs 51

Patentansprüche

1. Roboter mit mindestens einem linearen Vertikaltrieb (14) und einer Basis (12), welche eine erste, vertikal angeordnete Drehachse (10) mit einem ersten rotatorischen Antrieb (16) aufweist, wobei die
5 Drehachse (10) fest mit einem ersten starren, im Wesentlichen horizontal angeordneten Element (18) verbunden ist, welches drehbeweglich über eine zweite, vertikal angeordnete Drehachse (20) mit einem zweiten, im Wesentlichen horizontal angeordneten starren Element (24) verbunden ist, wobei die zweite Drehachse (20)
10 von der ersten Drehachse (10) beabstandet angeordnet ist und einen zweiten rotatorischen Antrieb (22) aufweist und das zweite starre Element (24) über eine dritte Drehachse (30) drehbeweglich mit einem dritten, im Wesentlichen horizontal angeordneten starren Element (26) verbunden ist, wobei die dritte Drehachse (30) von der zweiten
15 Drehachse (20) beabstandet angeordnet ist und einen dritten rotatorischen Antrieb (31) aufweist und das dritte starre Element (26) mit einem Effektor (28) verbunden ist und der mindestens eine lineare Vertikaltrieb (14) mit der Basis (12), dem Effektor (28) oder einer der Drehachsen (10, 20, 30) verbunden ist,
20 **dadurch gekennzeichnet, dass**
- der dritte rotatorische Antrieb (31) ein Nennabtriebsmoment (M_3) kleiner oder gleich 50% des Nennabtriebsmoment (M_2) des zweiten rotatorischen Antriebs (22) aufweist.
2. Roboter nach Anspruch 1,
25 **dadurch gekennzeichnet, dass**
- der dritte rotatorische Antrieb (31) ein Nennabtriebsmoment (M_3) kleiner oder gleich 25% des Nennabtriebsmoment (M_2) des zweiten rotatorischen Antriebs (22) aufweist.
3. Roboter nach Anspruch 1,
30 **dadurch gekennzeichnet, dass**

das Nennabtriebsmoment (M_3) des dritten rotatorischen Antriebs (31) der Bedingung

$$M_3 \leq \frac{6 \cdot \pi \cdot r \cdot l \cdot m}{t^2}$$

genügt, wobei r die Länge der Strecke vom Effektor (28) zum Schwerpunkt (39) ist, welcher durch das dritte starre Element (26),
5 einen gegebenenfalls vorhandenen Vertikaltrieb (14), den Effektor (28) sowie die Traglast gebildet wird, und l die Länge des dritten starren Elements (26), m die Masse eines gegebenenfalls vorhandenen Vertikaltriebs (14), des Effektor (28) sowie der Traglast und t maximale Zeit zur Ausführung einer Nullraumbewegung ist.

10 4. Roboter nach einem der vorhergehenden Ansprüche,

dadurch gekennzeichnet, dass

das erste starre Element (18) über eine vierte vertikal angeordnete Drehachse (40) mit einem vierten, im Wesentlichen horizontal angeordneten starren Element (44) drehbeweglich verbunden ist, wobei
15 die vierte Drehachse (40) einen vierten rotatorischen Antrieb (42) und den gleichen Abstand von der ersten Drehachse (10) wie die zweite Drehachse (20) aufweist und in Bezug auf die erste Drehachse (10) gegenüber der zweiten Drehachse (20) angeordnet ist und das vierte starre Element (44) über eine fünfte Drehachse (50)
20 drehbeweglich mit einem fünften, im Wesentlichen horizontal angeordneten starren Element (46) verbunden ist, die fünfte Drehachse (50) einen fünften rotatorischen Antrieb (51) aufweist und das dritte starre Element (26) und das fünfte starre Element (46) jeweils mit einem Effektor (28) verbunden sind und das zweite Element (24) die
25 gleiche Länge wie das vierte Element (44) und das dritte Element (26) die gleiche Länge wie das fünfte Element (46) aufweisen und das Nennabtriebsmoment (M_3) des dritten rotatorischen Antriebs (31) dem Nennabtriebsmoment (M_5) des fünften rotatorischen Antriebs (51) entspricht oder im Wesentlichen entspricht.

5. Roboter nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass
jeder Effektor (28) einen rotatorischen Antrieb (36) aufweist.
6. Roboter nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
5 **dadurch gekennzeichnet, dass**
jedem Effektor (28) ein linearer Vertikaltrieb (14) zugeordnet ist.
7. Roboter nach einem der Ansprüche 1 bis 5,
dadurch gekennzeichnet, dass
das erste starre Element (18) um die erste Drehachse (10)
10 vollumfänglich drehbar angeordnet ist.
8. Roboter nach einem der Ansprüche 1 bis 5,
dadurch gekennzeichnet, dass
der ersten Drehachse (10) ein linearer Vertikaltrieb (14) zugeordnet ist.
9. Roboter nach einem der Ansprüche 1 bis 5,
15 **dadurch gekennzeichnet, dass**
der Basis (12) ein linearer Vertikaltrieb (14) zugeordnet ist.
10. Roboter nach Anspruch 4,
dadurch gekennzeichnet, dass
der ersten Drehachse (10) ein linearer Vertikaltrieb (14) zugeordnet
20 ist, wobei der mit dem vierten starren Element (26) verbundene
Effektor (28) zwei rotatorische Antriebe (36, 37) mit
unterschiedlichen Drehachsen aufweist und der mit dem fünften
starken Element (46) verbundene Effektor (28) einen rotatorischen
Antrieb (36) und einen linearen Vertikaltrieb (14) aufweist.

11. Roboter nach Anspruch 4,
dadurch gekennzeichnet, dass
die Basis (12) einen linearen Horizontalantrieb (14) aufweist.

12. Roboter nach Anspruch 4,
dadurch gekennzeichnet, dass
die dritte und fünfte Drehachse (30, 50) Bremsen aufweisen.

13. Verfahren zum Positionieren eines Effektors (28) eines Roboters an einen vordefinierten Ort (P1) für ein vorgegebenes Zeitintervall (Δt), wobei der Roboter mindestens einen linearen Vertikaltrieb (14) und eine Basis (12) aufweist, welche eine erste, vertikal angeordnete Drehachse (10) mit einem ersten rotatorischen Antrieb (16) aufweist, wobei die Drehachse (10) fest mit einem ersten starren, im Wesentlichen horizontal angeordneten Element (18) verbunden ist, welches drehbeweglich über eine zweite, vertikal angeordnete Drehachse (20) mit einem zweiten, im Wesentlichen horizontal angeordneten starren Element (24) verbunden ist, wobei die zweite Drehachse (20) von der ersten Drehachse (10) beabstandet angeordnet ist und einen zweiten rotatorischen Antrieb (22) aufweist und das zweite starre Element (24) über eine dritte Drehachse (30) drehbeweglich mit einem dritten, im Wesentlichen horizontal angeordneten starren Element (26) verbunden ist, wobei die dritte Drehachse (30) von der zweiten Drehachse (20) beabstandet angeordnet ist und einen dritten rotatorischen Antrieb (31) aufweist und das dritte starre Element (26) mit dem Effektor (28) verbunden ist und der mindestens eine lineare Vertikaltrieb (14) mit der Basis (12), dem Effektor (28) oder einer der Drehachsen (10, 20, 30) verbunden ist,
gekennzeichnet durch folgende Verfahrensschritte:

5 - Verbringen des Effektors (28) an den vordefinierten Ort (P1) zu Beginn (t_1) des Zeitintervalls (Δt), wobei die zweite Drehachse (20) und die dritte Drehachse (30) mittels des ersten und des zweiten rotatorischen Antriebs (16, 22) derart ausgerichtet werden, dass sich die zweite Drehachse (20), die dritte Drehachse (30) und der Effektor (28) zu Beginn (t_1) des Zeitintervalls (Δt) auf einer Geraden befinden und das um die erste Drehachse (10) rotierende erste starre Element (18) zu Beginn (t_1) des Zeitintervalls (Δt) eine von Null verschiedene Winkelgeschwindigkeit (w_1) aufweist,

10 - Beaufschlagung des ersten starren Elements (18) während des Zeitintervalls (Δt) mittels des ersten rotatorischen Antriebs (16) derart, dass der Betrag der Winkelgeschwindigkeit des ersten starren Elements (18) während des Zeitintervalls (Δt) stets größer als Null ist und

15 - Beaufschlagung des zweiten und des dritten starren Elements (24, 26) während des Zeitintervalls (Δt) mittels des ersten und zweiten rotatorischen Antriebs (16, 22) und gegebenenfalls auch mittels des dritten rotatorischen Antriebs (31) derart, dass sich die dritte Drehachse (30) während des Zeitintervalls (Δt) auf einem Kreisbogen um den vordefinierten Ort (P1) bewegt und der Effektor (28) trotz der Rotation des ersten starren Elements (18) um die erste Drehachse (10) während des Zeitintervalls (Δt) am vordefinierten Ort (P1) verweilt.

20 14. Verfahren nach Anspruch 13,
dadurch gekennzeichnet, dass

25 derjenige Teil des Effektors (28) am vordefinierten Ort (P1) für das vorgegebene Zeitintervall (Δt) positioniert wird, welcher mit einem zu bearbeitenden Werkstück in Kontakt tritt_[TB10].

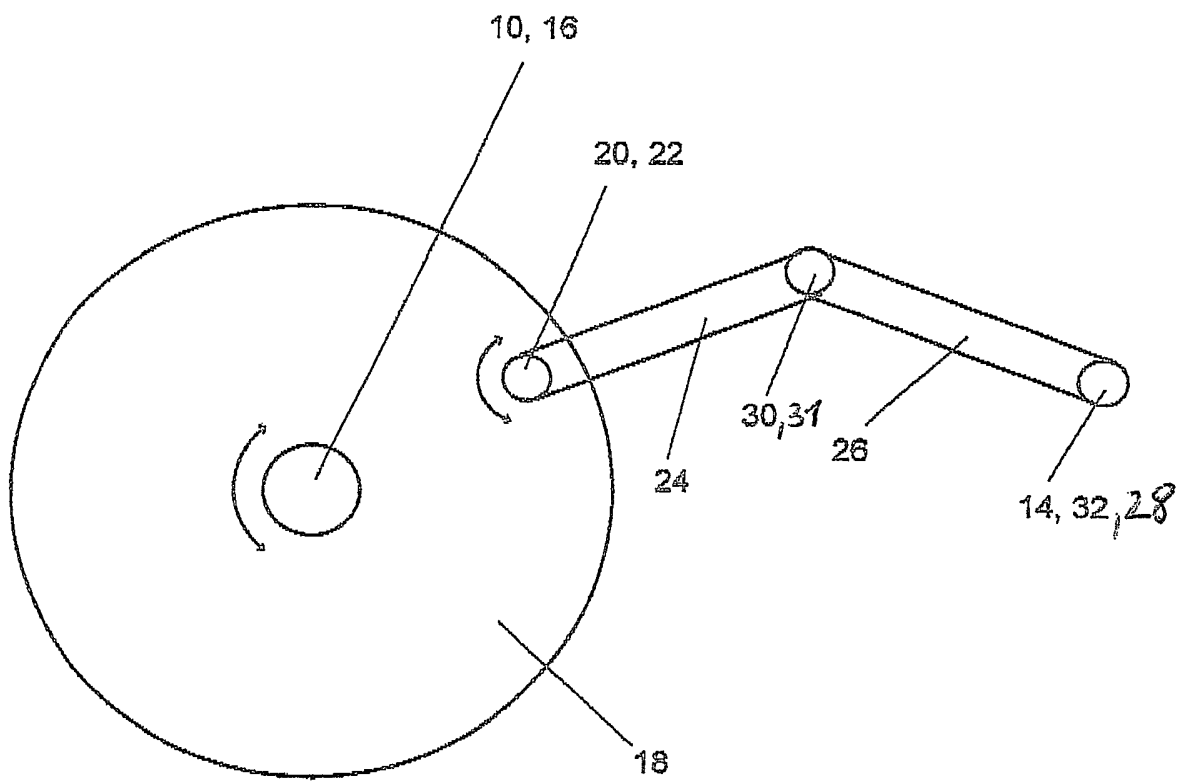


Fig. 1

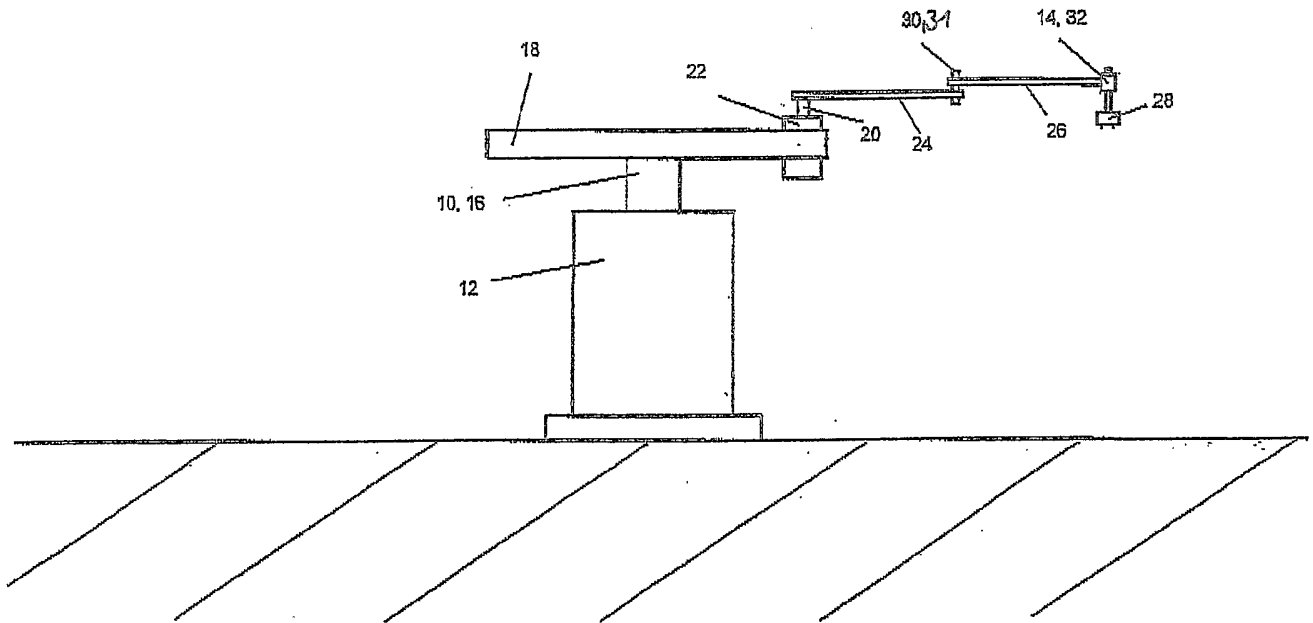


Fig. 2

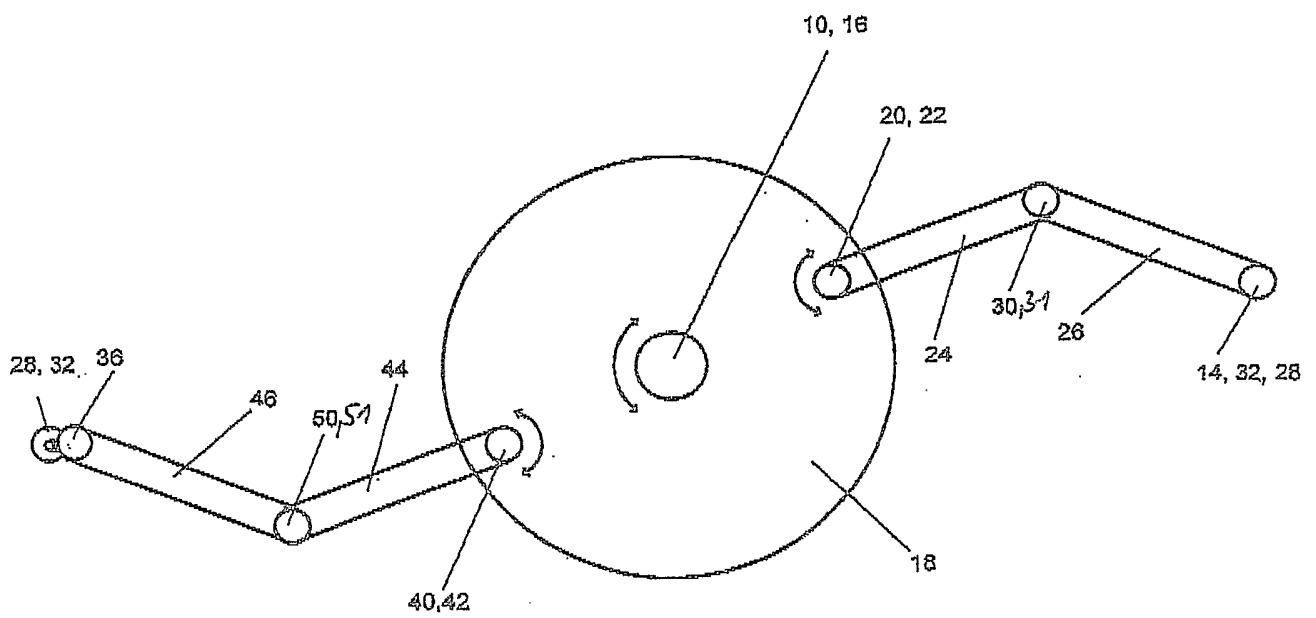


Fig. 3

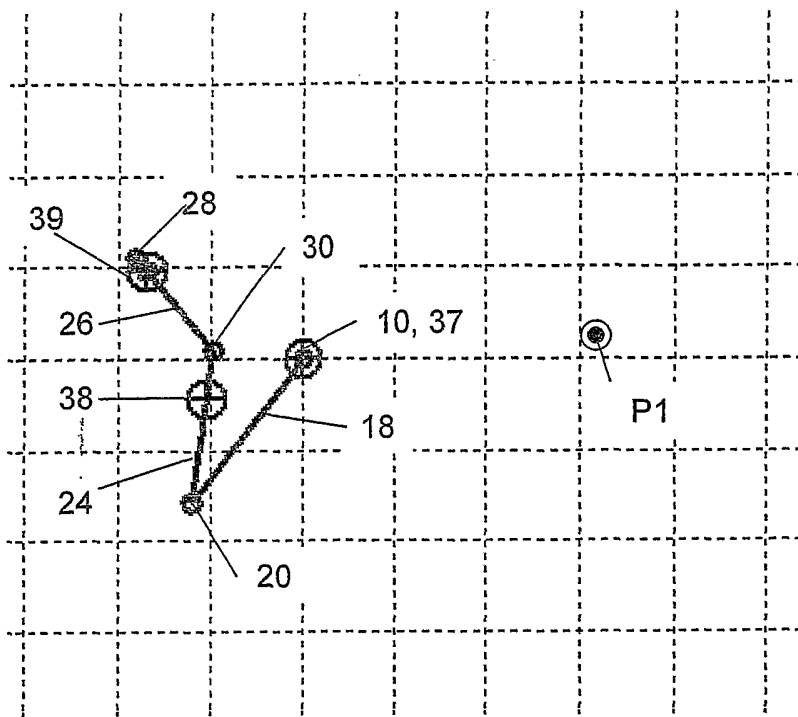


Fig 5

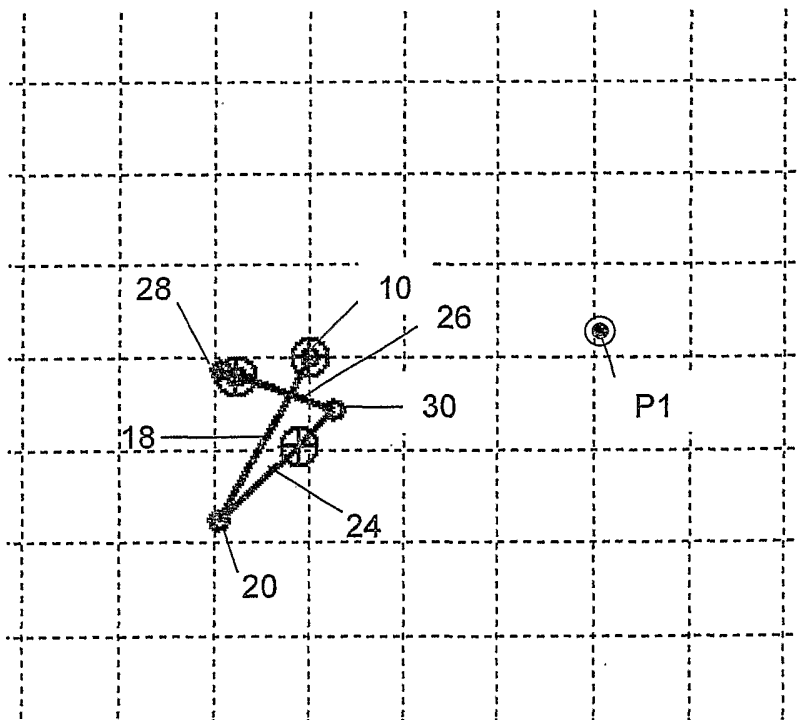


Fig 6

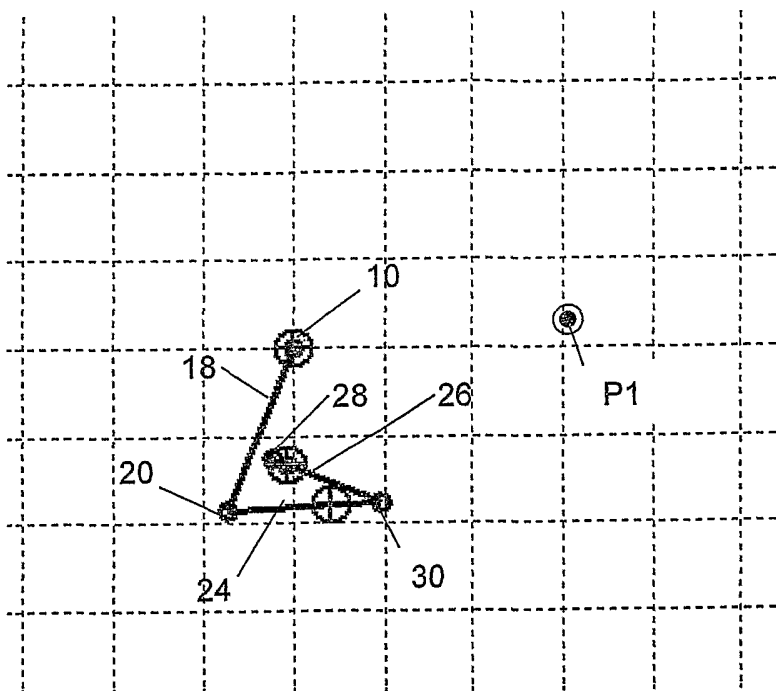


Fig 7

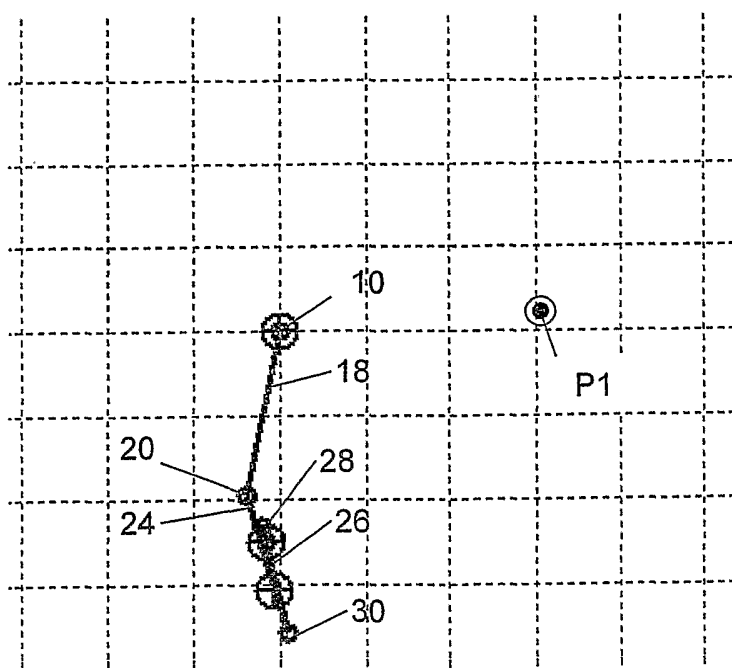


Fig 8

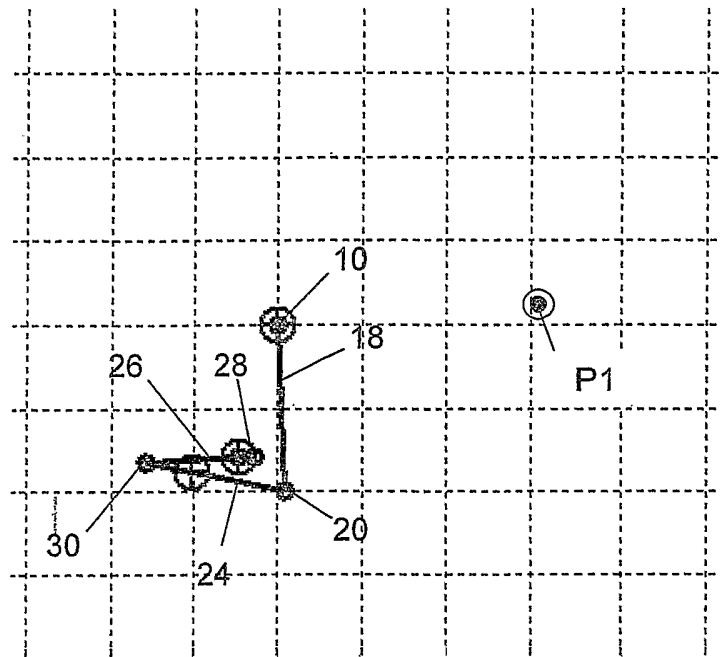


Fig 9

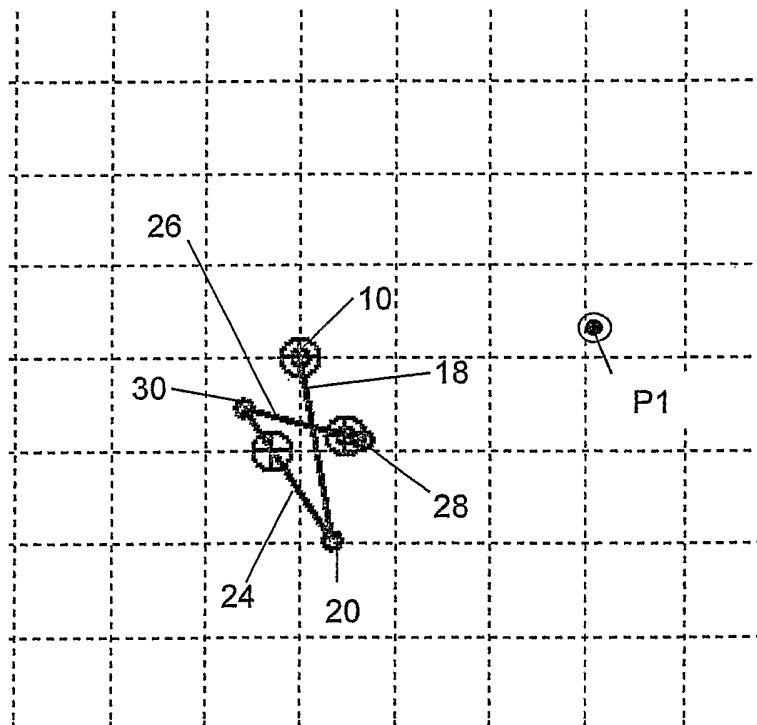


Fig 10

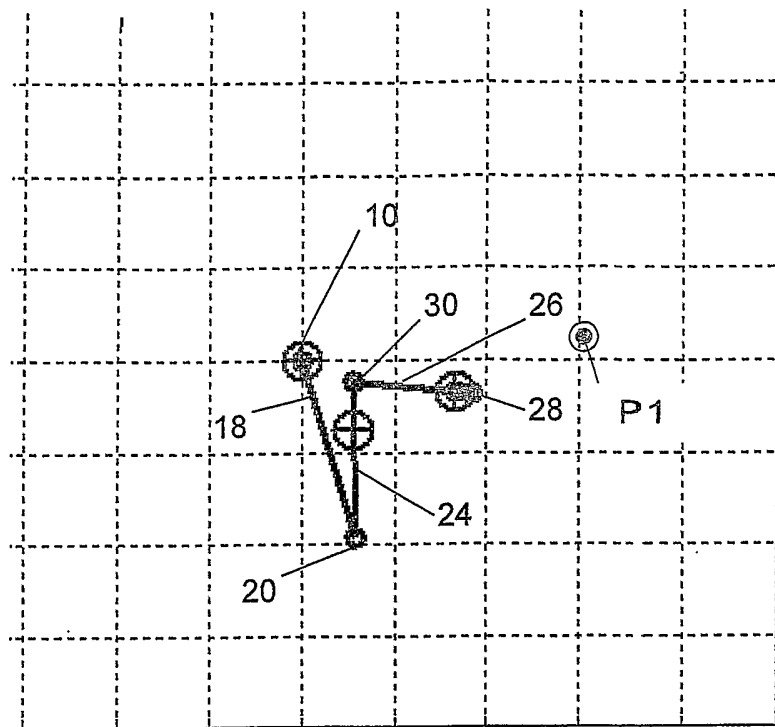


Fig 11

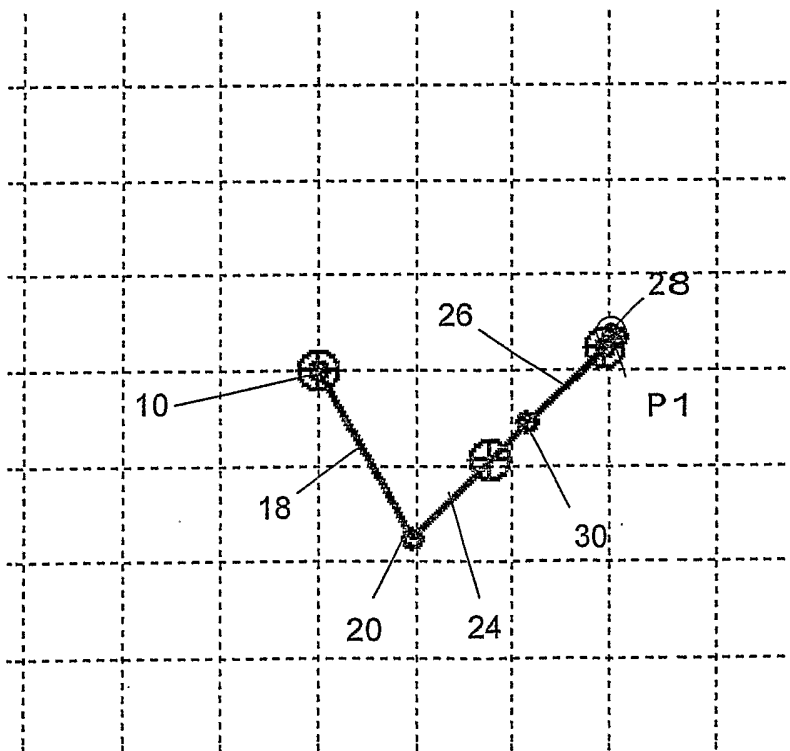


Fig 12

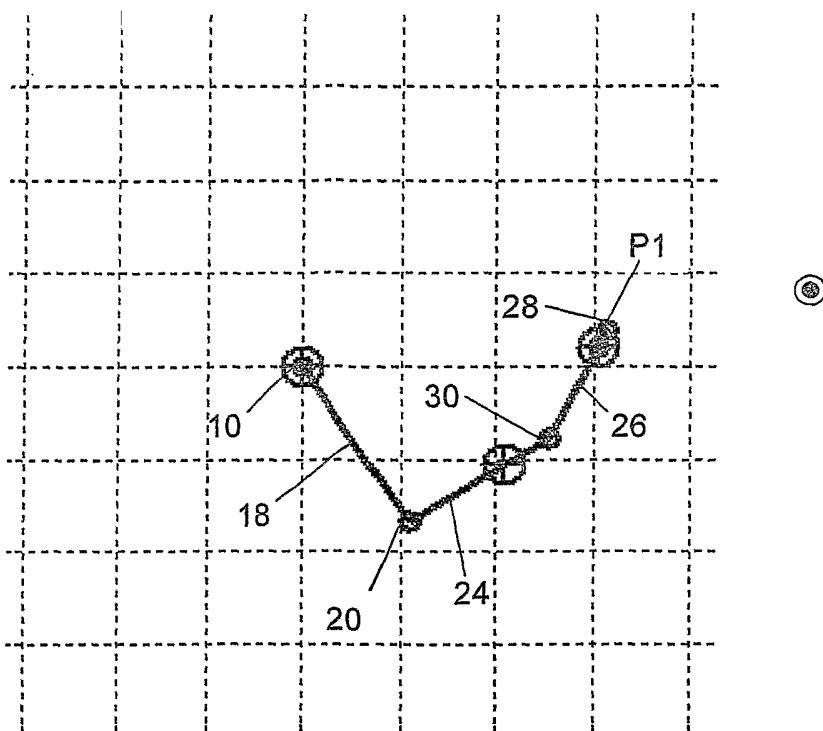


Fig 13

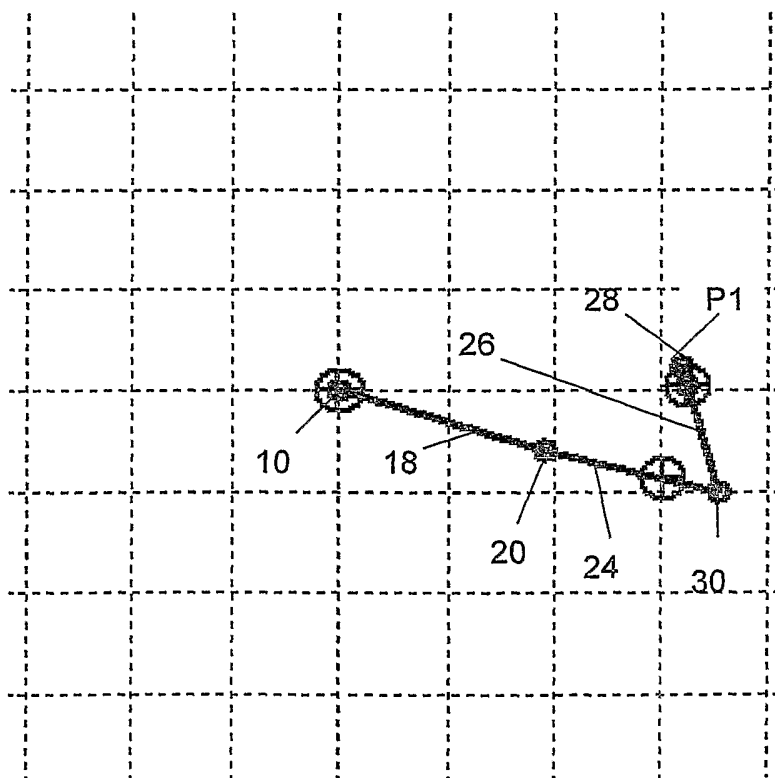


Fig 14

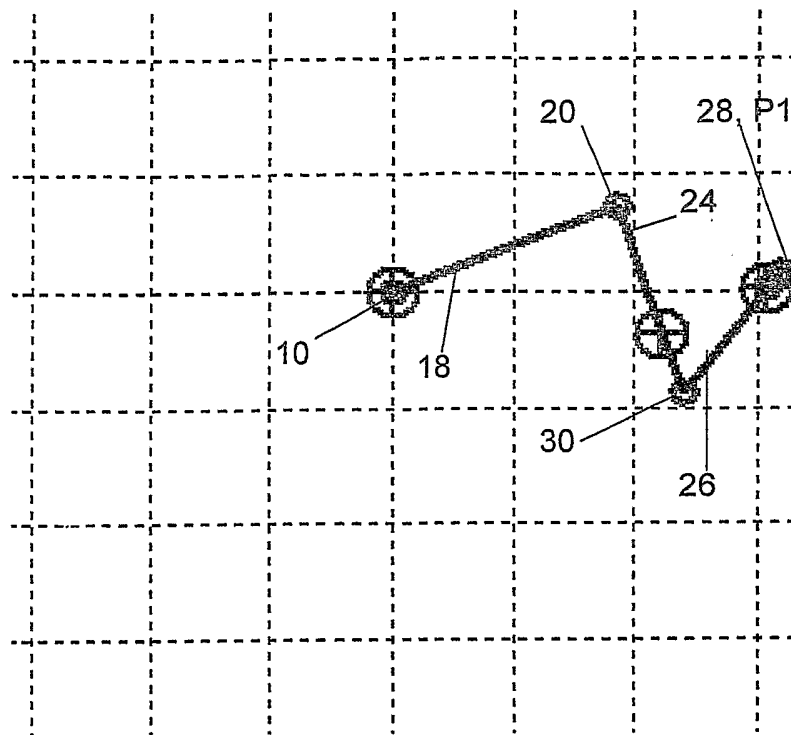


Fig 15

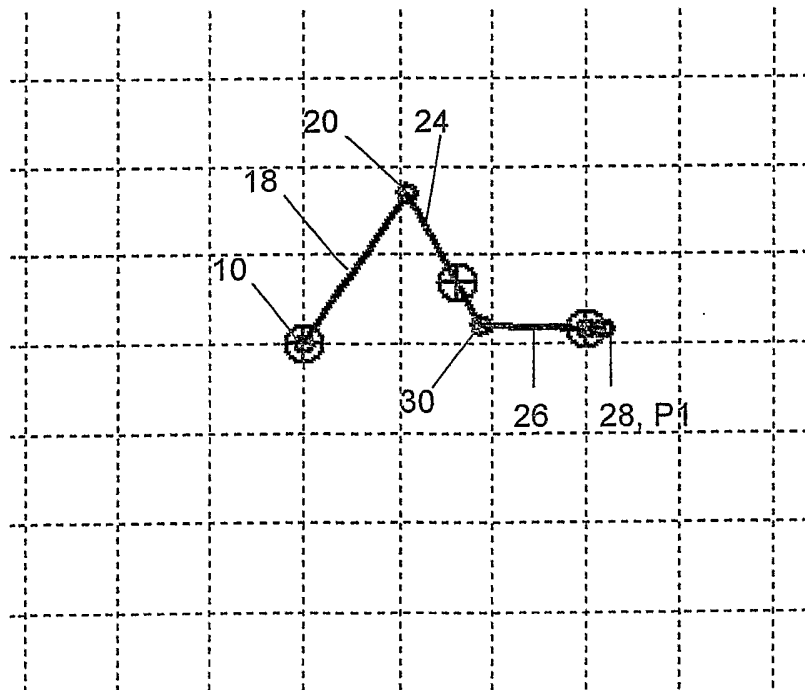


Fig 16

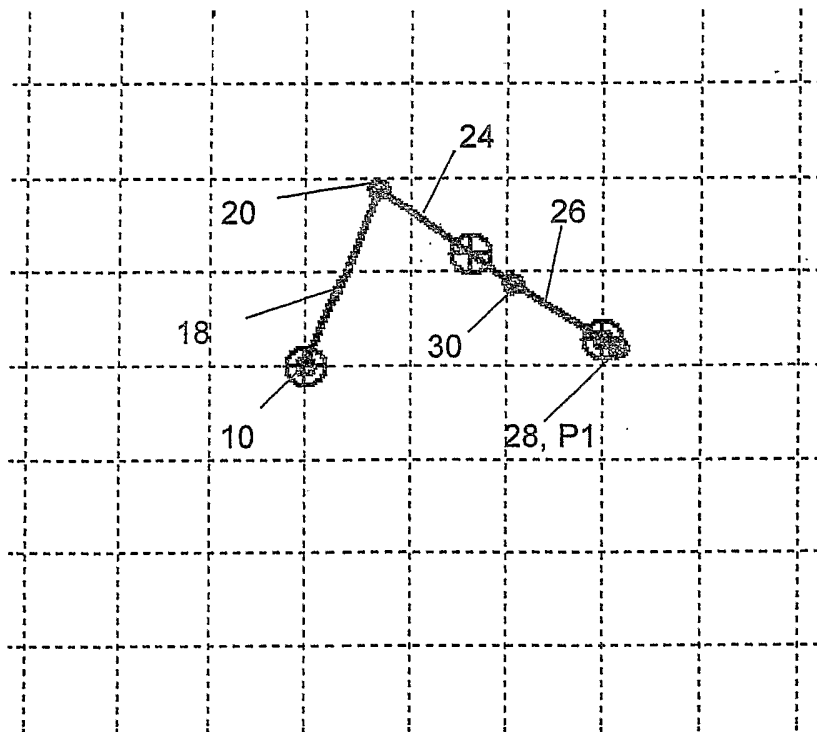


Fig 17