(19) Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2004 026 707 A1** 2005.12.22

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2004 026 707.3**
(22) Anmeldetag: **28.05.2004**
(43) Offenlegungstag: **22.12.2005**

(51) Int Cl.[7]: **B25J 9/18**

(71) Anmelder:
Technische Universität Kaiserslautern, 67663 Kaiserslautern, DE

(74) Vertreter:
Sawodny, M., Dipl.-Phys. Dr.rer.nat., Pat.-Anw., 89073 Ulm

(72) Erfinder:
Henrich, Dominik, Prof. Dr., 95447 Bayreuth, DE; Kuhn, Stefan, 55743 Idar-Oberstein, DE; Sauer, Bernd, Prof. Dr.-Ing., 67657 Kaiserslautern, DE

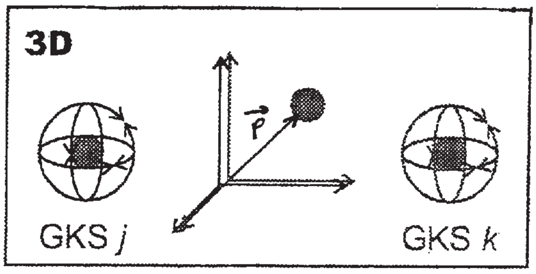
(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht gezogene Druckschriften:
DE 101 31 241 A1
US 46 98 572 A
WO 99/55 497 A1
SMIAROWSKI,A., ANDERSON,J.N.: "On Jacobians for Robots Containing Closed Kinematic Chains". In: Proceedings of the Twentieth Southeastern Symposium on System Theory, 20-22 March 1988, Page(s): 464-467;
LUH,J.Y.S., ZHENG,Y.-F.: "Computation of Input Generalized Forces for Robots with Closed Kinematic Chain Mechanisms", In: IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. RA 1, No.2, June 1985, S.95-103; NANUA, P., WALDRON, K.J., MURTHY,V.: "Direct Kinematic Solution of a Stewart Platform", In: IEEE Transactionn on Robotics and Automation, Vol.6, No.4, August 1990, S.434-444;
YAMAWAKI,T., MORI,O., OMATA,T.: "Nonholonomic Dynamic Rolling Control of Reconfigurable 5R Closed Kinematic Chain Robot with Passive Joints", In: Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Sept. 14-19, 2003, S.4054-4059,
THOMAS,U., MACIUSZEK,I., WHAL,F.M.: "A Unified Notion for Serial, Parallel, and Hybrid Kinematic Structures", In: Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 2002, S.2868-2873;
HAYATI,S., MIRMIRANI,M.: "Improving the Absolute Positioning Accurary of Robot Manipulators", In: Journal of Robotic Systems, 2(4), 397-413 (1985);
MEIER,C., STELZER,J.: "Koordinatentransformationen für Bahnsteuerung und schnelle Sensorsignalversteuerungen", In: Siemens Forsch.-und Entwickl.-Ber., Bd.14 (1985) Nr.5, S.224-229;

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur Steuerung von parallelkinematischen und hybriden Maschinen**

(57) Zusammenfassung: Verfahren zur Steuerung eines parallelen oder hybriden Roboters mit Gliedern und Gelenken, umfassend eine Modelleingabe, aus der Modellgleichungen resultieren, eine Steuerungsvorgabe, aus der Steuerungsgleichungen resultieren sowie eine numerische Lösung des Gesamtgleichungssystems, bestehend aus den Modellgleichungen und den Steuerungsgleichungen, wobei die Modelleingabe folgende Verfahrensschritte umfasst:
- jedem Glied wird ein Gliedkoordinatensystem zugeordnet, das sich so mit dem entsprechenden Glied im weiteren Bewegungsverlauf mitbewegt, dass die Lagekoordinaten des Glieds im zugeordneten Gliedkoordinatensystem unverändert bleiben;
- die Lagekoordinaten für ein Glied im Weltkoordinatensystem wird durch die Lage des zugeordneten Gliedkoordinatensystems, bezogen auf das Weltkoordinatensystem, bestimmt;
- für jedes Gelenk werden aus den Gelenkdaten Zwangsbedingungen für die Bewegungsmöglichkeiten der zugeordneten Gliedkoordinatensysteme der an das jeweilige Gelenk angrenzenden Glieder bestimmt;
- die Gesamtheit aller Zwangsbedingungen stellen die Modellgleichungen dar;
und wobei die Steuerungsvorgabe einen Verfahrensschritt umfasst, bei dem wenigstens einer ersten Koordinate eines ersten Gliedkoordinatensystems in Form einer Steuerungsgleichung ein absoluter Wert oder ein Wert relativ zu einer zweiten Koordinate eines zweiten Gliedkoordinatensystems zugeordnet wird.


3D
GKS j
GKS k

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Steuerung von parallelkinematischen Maschinen und hybriden Maschinen sowie ein Computerprogramm mit Programmcodemitteln und eine Steuerungseinheit zur Durchführung des Verfahrens.

[0002] Unter parallelkinematischen Maschinen werden Roboter verstanden, die parallel angeordnete Gliedketten umfassen. Hybriden Mechanismen weisen eine Kombination aus seriellen und parallelen Gliedketten auf. In der vorliegenden Anmeldung wird für solche parallelkinematischen Maschinen der äquivalente Ausdruck „paralleler Roboter" verwendet. Die parallel angeordneten Gliedketten bestehend aus Gliedern und Gelenken können beispielsweise durch die Verwendung von Schubgelenken längenveränderlich ausgebildet sein. Eine Arbeitsplattform, die aus verschiedenen Winkeln durch solche Gliedketten abstützt wird, kann nur dann linear bewegt werden, wenn wenigstens zwei Gliedketten und im allgemeinen Fall eine Vielzahl von Gliedketten in ihrer Längenausdehnung verändert werden. In einer anderen Ausgestaltung eines parallelen Roboters werden die längenveränderlichen Gliedketten durch längenkonstante Gliedketten ersetzt, deren Basisanlenkpunkte translatorisch verschoben werden, so dass wiederum durch das Zusammenspiel der Bewegungen der einzelnen Gliedketten die Arbeitsplattform in ihrer Position bzw. Orientierung verändert werden kann. Beispiele für parallele Roboter sind Hexapoden, die eine Bewegung im Raum unter Ausnutzung aller sechs Freiheitsgrade erlauben. Im Vergleich hierzu sind Tripoden auf drei Antriebe und drei Freiheitsgrade beschränkt.

[0003] Im Allgemeinen unterscheiden sich demnach parallele Roboter von seriellen Maschinen dadurch, dass Glied-Gelenk-Strukturen nebenläufig angeordnet sind, wobei jede der Glied-Gelenk-Strukturen aktiver oder passiver Natur sein kann. Die Bewegung eines Gliedpunktes, an dem beispielsweise eine Arbeitsplattform befestigt ist, setzt sich meist aus einer Mehrzahl von parallelen Glied-Gelenkbewegungen zusammen, wozu typischerweise eine Vielzahl von Aktoren zusammenwirken müssen.

[0004] Aus diesem Grund wird an die Steuerung bzw. die einer Steuerung zugrunde liegende Modellierung eines parallelen Roboters im Vergleich zu einer seriellen Maschine erweiterte Anforderungen gestellt. Im Allgemeinen wird zwischen zwei Steuerungsanforderungen, dem inversen kinematischen Problem und dem direkten kinematischen Problem, unterschieden. Beim inversen kinematischen Problem wird für einen Gliedpunkt, typischerweise die Arbeitsplattform, eine bestimmte Bewegungsbahn vorgegeben, etwa in der Form von Lagefolgen, wobei die zu Realisierung dieser Bewegungsbahn notwendigen Antriebskoordinaten der Aktuatoren zu bestimmen sind. Dagegen ist für das direkte kinematische Problem die Bewegung eines Gliedpunktes im Weltkoordinatensystem ausgehend von vorgegebenen Antriebskoordinaten zu berechnen.

[0005] Bisher sind drei unterschiedliche Gruppen von Modellierungsverfahren für parallele Roboter bekannt geworden. In der ersten Gruppe wird der parallele Roboter als ein Zusammenschluss von seriellen Ketten betrachtet, wodurch es möglich ist, die Verfahren zur Modellierung von seriellen Maschinen mittels des Denavit-Hartenberg-Prinzips anzuwenden. Diesbezüglich wird auf die Publikation Denavit, J. u. R. S. Hartenberg: A kinematic notation for lower pair mechanisms based on matrices, Journal of Applied Mechanics, Trans. of. the ASME, June 1955 verwiesen. Die einzelnen Ketten werden separat behandelt und in Form von Zwangsbedingungen, die die Bewegungsmöglichkeiten der einzelnen Ketten beschränken, zusammengeschlossen. Diese Vorgehensweise ist insofern als unnatürlich anzusehen, da der parallele Roboter eine Einheit bildet, die aus Gliedern und Gelenken und nicht aus der Verbindung einzelner serieller Ketten besteht. Hierdurch wird eine standardisierte Betrachtungsweise erschwert.

[0006] Eine zweite Gruppe von Verfahren basiert auf der Unterteilung des parallelen Roboters in einzelne Modulgruppen. In jeder Modulgruppe wird der ebene Zusammenhang zwischen zwei aneinandergrenzenden, durch ein Gelenk verbundene Glieder betrachtet, wobei die kinematischen Eigenschaften der Modulgruppe in Form eines Parametersatzes festgelegt sind. Hierbei werden Variablen und definierte Randbedingungen in Form von abhängigen Gleichungen (Gliedergruppenkonzept) formuliert und so ein Zusammenhang zwischen bestimmten Ein- und Ausgabewerten festgelegt. In einer Realisierung, die in der VDI-Richtlinie 2729, Modulare kinematische Analyse ebener Gelenkgetriebe mit Dreh- und Schubgelenken, Beuth-Verlag GmbH, 10772 Berlin beschrieben wird, werden die Modulgruppen als Baugruppen bezeichnet. Als nachteilig bei einer solchen Vorgehensweise ist die aus dem Modell resultierende Einschränkung der Relativbewegung der Glieder auf ebene Bewegungen anzusehen.

[0007] Eine dritte Gruppe von Verfahren teilt einen parallelen Roboter in mehrere unabhängige Maschen in der Form von geschlossenen Vektorzügen auf. Innerhalb einer solchen geschlossenen Masche ergibt sich eine

Abfolge von Gliedern und Gelenken, wobei entlang einer festgelegten Maschenrichtung ein Gelenk jeweils das angrenzende Folgeglied in seinen Bewegungsmöglichkeiten einschränkt. Nebenläufig werden also zwei Bedingungen betrachtet. Zum einen die Geschlossenheitsbedingung innerhalb einer Masche, zum anderen die Bewegungseinschränkungen für ein Glied innerhalb der Masche, das jeweils einem Gelenk nachfolgt. Zusätzlich ist zu beachten, dass vor Anwendung des Verfahrens zunächst die geschlossenen Vektorzüge bzw. unabhängigen Maschen ermittelt werden müssen, wofür es aufgrund der unterschiedlichen Bauformen der parallelen Roboter kein einheitliches Vorgehen gibt. Ferner ist für hybride Mechanismen die Formulierung einer Geschlossenheitsbedingung nicht möglich.

[0008] Der vorliegenden Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine Steuerung für parallele Roboter anzugeben, wobei das Steuerungsverfahren für eine Vielzahl unterschiedlicher Bauformen von parallelen Robotern auch für solche mit hybriden Mechanismen einheitlich gestaltet sein soll. Das Steuerungsverfahren sollte auf einer standardisierten Modellierung für unterschiedliche Arten von parallelkinematischen Maschinen beruhen, mit der es möglich ist, das Kinematikproblem, und zwar das inverse kinematische Problem wie auch das direkte kinematische Problem zu lösen. Steuerungsanforderungen sollten wiederum als Teil dieses Modells beschreibbar sein, so dass hieraus unmittelbar Sollpositionen bzw. Sollstellungen für die Antriebe resultieren, die dann wiederum in Ansteuerungssignale für die Aktoriken umgesetzt werden können. Für die einheitliche Modellierung sollten die voranstehend beschriebene Nachteile der bekannten Verfahren überwunden werden und insbesondere sollte eine einheitliche Betrachtung des parallelen Roboters sowie eine Behandlung von räumlichen Gelenken möglich sein, wobei die Modelleingabe und die Eingabe von Steuerungsanforderungen möglichst einfach und standardisiert sein sollten.

[0009] Zur Lösung dieser Aufgabe haben die Erfinder erkannt, dass sich die strukturelle Aufteilung eines parallelen Roboters in Glieder und Gelenke auch in der Modellbeschreibung widerspiegeln muss, d. h. jedes Glied und jedes Gelenk wird einheitlich behandelt. Aufgrund dieser Standardisierung ergibt sich die Möglichkeit parallele Roboter mit einer beliebigen Anzahl von Gliedern und unterschiedlichster strukturellen Anordnung zu modellieren. Insbesondere eine Beschränkung auf eine ebene Relativbewegung aneinandergrenzender Einzelglieder ist nicht mehr notwendig.

[0010] Im erfindungsgemäßen Verfahren lassen sich die Verfahrensschritte der Modelleingabe und der Steuerungsvorgabe unterscheiden. Unter der Modelleingabe wird die Erstellung von Modellgleichungen verstanden, wobei die Gesamtheit der Modellgleichungen die prinzipielle Bewegungsmöglichkeit des parallelen Roboters beschreiben, d. h. es wird keine Unterscheidung zwischen aktiven und passiven Gelenken vorgenommen. Die Steuerungsvorgabe lässt sich wiederum in eine Steuerungsanforderung und eine Steuerungseingabe unterteilen. Dabei wird unter der Steuerungsanforderung die Festlegung verstanden, ob das direkte oder das inverse kinematische Problem zu lösen ist. Aus der Steuerungsanforderung resultieren parametrisierte Steuerungsgleichungen, die in Verbindung zur erfindungsgemäßen Modelleingabe stehen, was im Folgenden noch detailliert dargelegt wird. Die Steuerungseingabe bezeichnet wiederum den Verfahrensschritt bei dem die Parameter der parametrisierten Steuerungsgleichung festgelegt werden, so dass hieraus Steuerungsgleichungen resultieren, die zusammen mit den Modellgleichungen ein Gesamtgleichungssystem ergeben. Dabei führt die numerische Lösung dieses Gesamtgleichungssystems je nach Art der Steuerungsanforderung entweder zur Lösung des inversen oder des direkten kinematischen Problems.

[0011] Ist beispielsweise das inverse kinematische Problem für eine bestimmte Sollbahn einer Arbeitsplattform zu lösen, so ist wiederum für jede der Sollpositionen in einer Lagefolge eine separate Steuerungseingabe vorzunehmen, während im allgemeinen Fall die Modelleingabe sowie die Steuerungsanforderung und damit die Modell- und die parametrisierten Steuerungsgleichungen nur einmalig erstellt werden müssen.

[0012] Im Einzelnen wird für die standardisierte Modelleingabe jedem der Glieder des parallelen Roboters ein lokales Koordinatensystem zugeordnet, das im Folgenden als Gliedkoordinatensystem bezeichnet wird. Bevorzugt wird für die Gliedkoordinatensysteme kartesische Koordinatensysteme, wobei jedoch auch hiervon abweichende schiefwinklige Koordinatensysteme möglich sind. Jedes der einem Glied zugeordneten Gliedkoordinatensysteme bewegt sich mit diesem während des gesamten Bewegungsverlaufs mit. Folglich bleiben die Lagekoordinaten des Gliedes in seinem zugeordneten Gliedkoordinatensystem konstant. Im einfachsten Fall wird ein Glied als Verbindung zwischen zwei Gelenken betrachtet, wodurch die Lagekoordinaten eines Gliedes durch die Positionsvektoren der beiden angrenzenden Gelenke bestimmt werden. Ein Glied kann aber auch die Verbindung für mehr als zwei Gelenke bilden, so dass für diesen allgemeinen Fall bevorzugt für alle einem Glied zugeordneten Gelenke die Positionsvektoren im zugeordneten Gliedkoordinatensystem des Glieds angegeben werden, um dessen Lagekoordinaten festzulegen. Wie dargestellt bleibt diese Festlegung konstant und muss nur einmalig vorgenommen werden. Demnach wird in der vorliegenden Anmeldung unter einem

Glied die starre Verbindung von Gelenken verstanden, d. h. alle beweglichen Strukturen des parallelen Roboters werden den Gelenken zugeordnet.

[0013] Zur Festlegung der Bewegung eines Glieds im Weltkoordinatensystem dienen die Koordinaten des Gliedkoordinatensystems relativ zum Weltkoordinatensystem. Im Dreidimensionalen sind dies die den sechs Freiheitsgraden des Gliedkoordinatensystems zugeordneten translativen und rotativen Koordinaten. Zur Vereinfachung der Modelleingabe wird bevorzugt, dass in der Ausgangsposition des parallelen Roboters zunächst alle Gliedkoordinatensysteme mit dem Weltkoordinatensystem zusammenfallen.

[0014] Eine bevorzugten Ausgestaltung der Modelleingabe umfasst einen Verfahrensschritt, bei dem die Gliedkoordinatensysteme generiert werden und die Glieder in diesen Gliedkoordinatensystemen bezüglich ihrer Lagekoordinaten festgelegt werden. Mit dieser Eingabe ist zunächst noch kein Zusammenhang zwischen den einzelnen Gliedern hergestellt, d. h. alle Gliedkoordinatensysteme können sich noch frei im Weltkoordinatensystem bewegen. Zur Vervollständigung der Modelleingabe werden deshalb die aus den Gelenken resultierenden Zwangsbedingungen wie folgt in das Modell eingebracht: Für jedes Gelenk werden Gelenkdaten eingeben. Diese Gelenkdaten umfassen den Gelenktyp, den Gelenkkontext und die Gelenkpunkte und/oder einer oder mehrere Achsvektoren. Unter dem Begriff Gelenktyp wird die Art eines Gelenks, beispielsweise ein Kugelgelenk oder ein Schubgelenk, verstanden. Der Gelenkkontext legt wiederum fest, welche Glieder mit dem vorliegenden Gelenk verbunden sind. In Abhängigkeit des Gelenktyps wird festgelegt, ob Gelenkpunkte und/oder Achsvektoren bestimmt werden müssen, wobei sich die hierfür notwendigen Koordinatenwerte aus der Lage und Orientierung des Gelenks in der Ausgangsposition ergeben. Zu beachten ist, dass die Gelenkpunkte und/oder Achsvektoren, die wiederum die Wirkung des Gelenks auf die angrenzenden Glieder beschreiben, aus der Sicht des jeweiligen Gliedes in seinem zugeordneten Gliedkoordinatensystem als vektorielle Konstanten aufzufassen sind.

[0015] Jede aus den Gelenkdaten resultierende Zwangsbedingung führt wiederum zu einer Gleichung, die wenigstens einen Teil der Koordinaten der an das jeweilige Gelenk angrenzenden Gliedkoordinatensysteme verbindet, wobei in der vorliegenden Anmeldung eine solche Gleichung als Modellgleichung bezeichnet wird. Alle Modellgleichungen zusammen ergeben wiederum die grundsätzliche Bewegungsmöglichkeit des parallelen Roboters.

[0016] Wird nun in einem weiteren Verfahrensschritt zur Modellierung des parallelen Roboters die Steuerungsvorgabe hinzugenommen, so kann über die Steuerungsanforderung und die Steuerungseingabe das System der Steuerungsgleichungen erstellt werden. Für die Steuerungsanforderung wird festgelegt, ob das direkte oder das inverse kinematische Problem zu lösen ist und welches die aktiven Gelenke oder Glieder sind, für die bei der Steuerung Vorgaben gemacht werden. In Abhängigkeit dieser Festlegung resultieren parametrisierte Steuerungsgleichungen. Die Parameter werden dann bei der Steuerungseingabe mit Werten belegt.

[0017] Für das inverse kinematische Problem werden den freien Lagevariablen (Position und/oder Orientierung) wenigstens eines Glieds bestimmte Werte zugeordnet. Im erfindungsgemäßen Verfahren repräsentiert ein zugeordnetes Gliedkoordinatensystem die Lage eines Glieds, so dass für das inverse kinematische Problem entsprechend eine oder mehrere Koordinaten wenigstens eines Gliedkoordinatensystems gesetzt werden. Für das direkte kinematische Problem haben die parametrisierten Steuerungsgleichungen eine solche Struktur, dass erfindungsgemäß bei der Steuerungseingabe jeweils zwei aneinandergrenzende Gliedkoordinatensysteme in Zusammenhang zueinander gesetzt werden, d. h. es wird ein Relativwert, der auch variabel sein kann, für einen Winkel oder eine Distanz, jeweils ausgedrückt durch Koordinaten der beiden Gliedkoordinatensysteme vorgeben.

[0018] Die Steuerungsgleichungen führen in Verbindung mit den Modellgleichungen, bis auf einige Spezialfälle, zu einer bestimmten Stellung des parallelen Roboters, wobei zur Erzeugung einer Bewegungsfolge der Verfahrensschritt der Steuerungseingabe mehrmals wiederholt werden kann, d. h. die resultierenden Steuerungsgleichungen werden durch unterschiedliche Vorgaben für die Parameter der parametrisierten Steuerungsgleichungen schrittweise verändert. Die voranstehend genannte Einschränkung wonach der Fall auftreten kann, dass die Modellgleichungen mehr als eine Lösung haben, also unterbestimmt sind, ist in der Praxis deshalb meist unbeachtlich, da von einer bestimmten Ausgangsstellung der Glieder ausgegangen wird von der aus sich die Bewegung entwickelt. Der Folgebewegungsschritt ausgehend von einer bekannten Lage wird so hinreichend klein ausgeführt, dass weitere, theoretische mögliche Lösungen des Modellgleichungssystems zwar existieren, jedoch insbesondere bei einer numerischen Lösung des Modellgleichungssystems nicht als erstes aufgefunden werden. Dennoch sind bestimmte mechanische Strukturen paralleler Roboter denkbar, bei denen ein Umklappen von einer ersten Stellung in eine zweite Stellung möglich ist. Solche, durch die mechanische Struktur bedingte Uneindeutigkeit würden sich dann auch auf die Modellgleichungen übertragen und zu zwei oder mehreren möglichen Lösungen führen, wobei es eine Frage des angewandten numerischen Verfahrens ist, ob diese auch aufgefunden werden. Außerdem kann der Fall auftreten, dass die Verbindung von Steuerungsgleichungen und Modellgleichungen zu einem überbestimmten Gesamtgleichungssystem führt.

[0019] Aufgrund der im Allgemeinen auftretenden Nichtlinearitäten des Gesamtgleichungssystems werden zur Lösung lediglich numerisch basierte Iterationsverfahren in Frage kommen. Besonders bevorzugt wird, das Gesamtgleichungssystem als Nullstellenproblem umzuformulieren. Als geeignete numerische Verfahren hat sich das gedämpfte Newton-Verfahren in Verbindung mit dem Householder-Verfahren erwiesen.

[0020] Aufbauend auf der erfindungsgemäßen Modellbeschreibung offenbart das Steuerungsverfahren auch die Erzeugung von Steuerungsbefehlen bzw. Steuerungssignalen zur Bewegungsführung der Aktoriken des parallelen Roboters ausgehend von der Lösung des Kinematikproblems. Das Steuerungsverfahren und die hiermit verbundene Modellgenerierung kann in einem dem parallelen Roboter zugeordneten Steuerungsgerät durchgeführt werden, mit welchem sowohl die Benutzerschnittstelle wie auch die Schnittstelle zum parallelen Roboter selbst realisiert werden kann.

[0021] Das Steuerungsverfahren oder Teile davon können in Form eines Computerprogramms mit Programmcode-Mitteln auf einem Computer ausgeführt werden, wobei hierdurch Gliedpositionen oder Gelenkkoordinaten bestimmt werden, die wiederum durch eine weitere, direkt einem parallelen Roboter zugeordnete Steuerungseinheit übermittelt werden. Ferner ist ein Computerprogramm mit Programmcode-Mitteln offenbart, das das erfindungsgemäße Steuerungs- und Modellierungsverfahren realisiert und welches auf einem computerlesbaren Datenträger abgespeichert ist.

[0022] Die Erfindung wird anhand der nachfolgenden Figuren genauer beschrieben.

[0023] Fig. 1a–e stellen elementare Zwangsbedingungen dar.

[0024] Fig. 2a–d zeigen Beispiele für reale Gelenke.

[0025] Fig. 3 zeigt ein zweidimensionales Beispiel eines parallelen Roboters.

[0026] Für die Modelleingabe eines zu steuernden parallelen Roboters wird erfindungsgemäß für jedes der Glieder des Roboters ein zugeordnetes Gliedkoordinatensystem erzeugt. Bevorzugt wird hierbei davon ausgegangen, dass in der Ausgangsposition alle Gliedkoordinatensysteme mit dem Weltkoordinatensystem zusammenfallen. Als Glied wird jene strukturelle Einheit angesehen, die durch angrenzende Gelenke begrenzt wird. Demnach kann einem Glied in seinem zugeordneten Gliedkoordinatensystem durch die Angabe der Ortsvektoren der begrenzenden Gelenke bezüglich seiner Lagekoordinaten festgelegt werden. Diese werden sich in den Koordinaten des zugeordneten Gliedkoordinatensystems während des gesamten Bewegungsverlaufes nicht mehr verändern. Hiervon zu unterscheiden ist jedoch die Betrachtung eines Glieds vom Weltkoordinatensystem aus gesehen, wobei zur Beschreibung der Gliedposition und Orientierung eines Glieds im Weltkoordinatensystem die Relativkoordinaten zwischen dem Weltkoordinatensystem und dem zugeordneten Gliedkoordinatensystem herangezogen werden.

[0027] Für die Eingabe der Ausgangsposition ist es am einfachsten, zunächst die Anzahl der Glieder des parallelen Roboters einzugeben, wobei dann vorteilhafterweise jedes der Glieder indiziert wird. Danach kann die Lage der einzelnen Gelenke im Weltkoordinatensystem zusammen mit den Indizes der angrenzenden Glieder angegeben werden, in der vorliegenden Anmeldung wird dieser Verfahrensschritt als Angabe des Gelenkkontexts bezeichnet, wodurch dann auch automatisch die Lagekoordinaten der Glieder in ihren Gliedkoordinatensystemen festgelegt sind.

[0028] Zur Betrachtung der Lageposition eines Gliedes in Weltkoordinaten wird die Position und Orientierung des zugeordneten Gliedkoordinatensystems in Bezug auf das Weltkoordinatensystem verwendet. Eine Möglichkeit dies auszudrücken, besteht in der Angabe eines Translationsvektors, der die Angabe des Ursprungspunkts eines Gliedkoordinatensystems im Weltkoordinatensystem ermöglicht, wobei dieser Vektor für den dreidimensionalen Fall drei Koeffizienten aufweist. Entsprechend sind dann zur Bestimmung der Orientierung des Gliedkoordinatensystems die drei Eulerwinkel zuzuordnen. Im Allgemeinen lässt sich für den räumlichen Fall dann ein Vektor $\vec{v}$ aus einem Gliedkoordinatensystem durch folgende Gleichung

$$\vec{v}' = \overleftarrow{t} + R(\vec{\varphi})\cdot\vec{v} \qquad (1)$$

in einen Vektor $\vec{v}'$ des Weltkoordinatensystems transformieren, wobei $\vec{t}$ den Translationsvektor und $R(\vec{\varphi})$ eine Matrix repräsentiert, die im Allgemeinen als Variablen die drei Euler-Winkel φ_x, φ_y und φ_z aufweist und sich im dreidimensionalen Fall wie folgt darstellt:

$$R(\vec{\varphi}) = \begin{pmatrix} \cos\varphi_z & -\sin\varphi_z & 0 \\ \sin\varphi_z & \cos\varphi_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \cos\varphi_y & 0 & \sin\varphi_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\varphi_y & 0 & \cos\varphi_y \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi_x & -\sin\varphi_x \\ 0 & \sin\varphi_x & \cos\varphi_x \end{pmatrix} \qquad (2)$$

[0029] Für die bevorzugte Ausgestaltung, wonach bei der Ausgangsposition alle Gliedkoordinatensysteme mit dem Weltkoordinatensystem übereinstimmen, werden die drei Koordinaten des Translationsvektors $\vec{t}$ und die drei Euler-Winkel den Wert 0 annehmen, was sich dann im Bewegungsverlauf ändert.

[0030] Durch die Eingabe der Gelenkdaten des jeweiligen parallelen Roboters werden die angrenzenden Gliedkoordinatensysteme in ihren Bewegungsmöglichkeiten relativ zueinander beschränkt, wobei sich aus den hieraus resultierenden Zwangsbedingungen die Modellgleichungen ergeben. Eine Modellgleichung ist folglich eine Verknüpfung wenigstens eines Teils der Koordinaten der Gliedkoordinatensysteme für jene Glieder, die durch das entsprechende Gelenk verbunden werden.

[0031] Zur Darstellung dieses Zusammenhangs soll zunächst vor der Behandlung realer Gelenke auf elementare Zwangsbedingungen für aneinandergrenzende Gliedkoordinatensysteme eingegangen werden, wobei komplexe, ein Gelenk beschreibende Zwangsbedingungen dann aus diesen elementaren Zwangsbedingungen zusammensetzbar sind. Hierzu wird auf die Fig. 1A bis Fig. 1E verwiesen. In jeder dieser Figuren sind mittig je zwei Gliedkoordinatensysteme im Ausgangszustand, d. h. in deckungsgleicher Lage gezeigt. Diese beiden Koordinatensysteme werden im Folgenden als Gliedkoordinatensystem j und Gliedkoordinatensystem k bezeichnet.

[0032] Im Fall der Fig. 1A besitzen diese beiden Gliedkoordinatensysteme einen gemeinsamen Punkt, wobei beide Gliedkoordinatensysteme um diesen Punkt rotieren können. Die drei resultierenden, rotativen Freiheitsgrade sind für beide Gliedkoordinatensysteme skizziert. Wird der Vektor vom Ursprung der Gliedkoordinatensysteme zum gemeinsamen Punkt mit $\vec{p}$ bezeichnet, so lässt sich die resultierende Zwangsbedingung beispielsweise wie folgt darstellen:

$$\vec{t}_j + R(\vec{\varphi}_j)\cdot\vec{p} = \vec{t}_k + R(\vec{\varphi}_k)\cdot\vec{p} \qquad (3)$$

[0033] Hierbei sind die Variablenbezeichnungen entsprechend zu Gleichung 1 gewählt, d. h. der Positionsvektor $\vec{p}$ zum gemeinsamen Punkt muss auch rücktransformiert in das Weltkoordinatensystem für beide Gliedkoordinatensysteme das gleiche Ergebnis liefern. Hierbei ist zu beachten, dass die Positionsvektoren $\vec{p}$ innerhalb ihrer Gliedkoordinatensysteme fest sind und immer den gleichen Punkt bezeichnen, d. h. die Darstellung von $\vec{p}$ in den beiden Koordinatensystemen wird sich nicht verändern, so dass in Gleichung 3 der Positionsvektor $\vec{p}$ nicht für das Gliedkoordinatensystem j und das Gliedkoordinatensystem k unterschieden wird. Vom Weltkoordinatensystem aus betrachtet, weisen die Positionsvektoren im Allgemeinen in unterschiedliche Richtungen, jedoch bei der Beachtung der Translation und Rotation der Gliedkoordinatensysteme gemäß Gleichung 3 immer auf einen gemeinsamen Punkt, der jedoch im Weltkoordinatensystem verschiebbar ist.

[0034] Fig. 1B stellt den Fall dar, dass das Gliedkoordinatensystem j und das Gliedkoordinatensystem k im Weltkoordinatensystem die gleiche Orientierung aufweisen sollen. Folglich können beide Gliedkoordinatensysteme relativ zueinander nur noch translatorische Bewegungen ausführen. Mathematisch lässt sich dies ausdrücken durch die Übereinstimmung der den Rotationsbewegungen der beiden Gliedkoordinatensysteme zugeordneten Euler-Winkel. Dies entspricht folgendem formelmäßigen Zusammenhang:

$$\vec{\varphi}_j = \vec{\varphi}_k \qquad (4)$$

[0035] Eine weitere elementare Zwangsbedingung ist in Fig. 1C dargestellt. Die beiden Gliedkoordinatensysteme weisen hierbei einen gemeinsamen Achsvektor $\vec{a}$ auf.

[0036] Dieser Achsvektor ist in Fig. 1C skizziert zusammen mit den möglichen Freiheitsgraden der beiden Gliedkoordinatensysteme relativ zueinander. Hierbei sind weiterhin translative Bewegungen möglich, wie auch ein rotativer Freiheitsgrad um die durch den Achsvektor $\vec{a}$ vorgegebene Richtung. Diese elementare Zwangsbedingung verknüpft wiederum einen Teil der Weltkoordinaten der beiden angrenzenden Gliedkoordinatensysteme durch folgenden mathematischen Zusammenhang:

$$R(\vec{\varphi}_j)\cdot\vec{a} = R(\vec{\varphi}_k)\cdot\vec{a} \quad (5)$$

[0037] Fig. 1D zeigt den Fall von zwei senkrecht aufeinander stehenden Achsvektoren $\vec{a}_j$ und $\vec{a}_k$ jeweils für das Gliedkoordinatensystem j und das Gliedkoordinatensystem k. Beide Gliedkoordinatensysteme können sich zwar noch translativ bewegen, jedoch ist die Rotation auf jeweils einen einzigen Rotationsfreiheitsgrad beschränkt, der durch den jeweiligen Achsvektor festgelegt ist. Mathematisch lässt sich dies wie folgt ausdrücken, was auch gleichzeitig die Darstellung der die beiden Gliedkoordinatensysteme verknüpfenden elementaren Zwangsbedingung ist:

$$R(\vec{\varphi}_j)\cdot\vec{a}_j\cdot R(\vec{\varphi}_k)\cdot\vec{a}_k = 0 \quad (6)$$

[0038] Eine weitere elementare Zwangsbedingung, bei der ein Punkt des einen Gliedkoordinatensystems auf einer Achse des anderen Gliedkoordinatensystems liegen muss, ist in Fig. 1E skizziert. Dargestellt ist, dass dem Gliedkoordinatensystem j als Bewegungsfreiheiten die Rotation um diese Achse sowie eine Verschiebung entlang der Achse verbleiben. Das Gliedkoordinatensystem k kann sich in Achsrichtung verschieben und in alle drei Winkelrichtungen um den Punkt rotieren. Formelmäßig lässt sich diese elementare Zwangsbedingung wie folgt darstellen:

$$(\vec{t}_j - \vec{t}_k + R(\vec{\varphi}_j)\cdot\vec{p} - R(\vec{\varphi}_k)\cdot\vec{p}) \times (R(\vec{\varphi}_j)\cdot\vec{a}) = 0 \quad (7)$$

[0039] In Worten ausgedrückt bedeutet dies, dass der Vektor $\vec{p}$, der dem Punkt auf der Achse zugeordnet ist, für die beiden Gliedkoordinatensysteme jeweils ins Weltkoordinatensystem zurück transformiert wird. Die Differenz der sich so ergebenden Vektoren spannt wiederum einen Vektor auf, der linearabhängig zum ins Weltkoordinatensystem rücktransformierten Achsvektor $\vec{a}$ ohne die translative Komponente ist, so dass sich aus dem Kreuzprodukt dieser beiden Vektoren der Nullvektor ergibt.

[0040] Weitere elementare Zwangsbedingungen sind die Unterbindung einzelner Bewegungsfreiheiten für ein Gliedkoordinatensystem. Diese sind im Einzelnen nicht in den Figuren dargestellt, wobei sich jedoch für den dreidimensionalen Fall für jede der einzelnen sechs Freiheitsgrade der Wert der zugeordneten Koordinate auf einen bestimmten Wert, etwa zu Null, setzen lässt, so dass weitere sechs elementare Zwangsbedingungen resultieren.

[0041] Realen Gelenken können wiederum zur Charakterisierung des Gelenktyps einzelne oder eine Kombination von elementaren Zwangsbedingungen zugeordnet werden. Für einige beispielhafte Gelenke ist dies in den Fig. 2A–Fig. 2D dargestellt. Fig. 2A zeigt ein Kugelgelenk. Diesem ist die elementare Zwangsbedingung eines gemeinsamen Punktes zugeordnet. Als Teil der Gelenkdaten muss als Gelenkpunkt der Positionsvektor $\vec{p}$ dieses gemeinsamen Punktes angegeben werden.

[0042] Fig. 2B zeigt ein Scharniergelenk, das die Bewegungsfreiheit der beiden angrenzenden Glieder auf lediglich eine Rotation in Richtung der Gelenkachse beschränkt. Ausgedrückt durch elementare Zwangsbedingungen entspricht dies einer Kombination der elementaren Zwangsbedingung eines gemeinsamen Punktes sowie der elementaren Zwangsbedingung eines gemeinsamen Achsvektors. Als Teil der Gelenkdaten sind somit als Gelenkpunkt der gemeinsame Punkt $\vec{p}$ sowie $\vec{a}$ als Achsvektor anzugeben.

[0043] Fig. 2C zeigt ein Kardangelenk. Hier sind die verbleibenden Freiheitsgrade der angrenzenden Glieder auf zwei Drehrichtungen beschränkt, wobei die beiden Drehrichtungen für die Glieder senkrecht aufeinander stehen. Entsprechend kann einem Kardangelenk somit die elementare Zwangsbedingung eines gemeinsamen Punktes sowie die elementare Zwangsbedingung zweier senkrecht aufeinander stehender Achsvektoren zugeordnet werden. Als Gelenkdaten wären für diesen Fall der gemeinsame Punkt $\vec{p}$ sowie die Rotationsvektoren $\vec{a}_j$ und $\vec{a}_k$ anzugeben.

[0044] Fig. 2D zeigt ein Schubgelenk ohne Orientierung. Beide Glieder können sich entlang der Schubrichtung bewegen sowie um diese Richtung frei rotieren. Demnach sind diesem Gelenktyp die elementaren Zwangsbedingungen eines gemeinsamen Achsvektors sowie die elementare Zwangsbedingung eines Punktes in einem der Gliedkoordinatensysteme auf einer Achse des zweiten Gliedkoordinatensystems zugeordnet. Als Teil der Gelenkdaten sind entsprechend der Achsvektor $\vec{a}$ sowie der Gelenkpunkt $\vec{p}$ anzugeben.

[0045] Werden nun alle Modellgleichungen zu einem Modellgleichungssystem kombiniert, so stellt jede Lö-

sung dieses Gleichungssystems eine mögliche Bewegungsstellung des parallelen Roboters dar. Im Allgemeinen wird dieses Gleichungssystem somit unterbestimmt sein. Die Gleichungen, die zur Festlegung einer bestimmten Sollposition im Weltkoordinatensystem bzw. einer bestimmten Sollposition in Antriebskoordinaten führen, ergeben sich wiederum durch eine zusätzliche Eingabe, die im Folgenden als Steuerungsvorgabe bezeichnet wird. Zunächst soll dies anhand des inversen kinematischen Problems erläutert werden:
Mindestens einem Punkt auf einem Glied, der beispielsweise eine Arbeitsplattform trägt, wird hierbei eine bestimmte Position im Weltkoordinatensystem zugeordnet. Für eine Bewegungsfolge würde dies bedeuten, dass die Bewegung zu einem bestimmten Zeitpunkt eingefroren wird. Da die Lagekoordinaten des Gliedes in seinem Gliedkoordinatensystem bekannt und unveränderlich sind, wird durch diese Angabe einige oder alle Freiheitsgrade des zugeordneten Gliedkoordinatensystems festgelegt. Diese entsprechende Festlegung wird als Steuerungsgleichungen bezeichnet. Aus einer Kombination der Modellgleichungen und der Steuerungsgleichungen entsteht ein Gesamtgleichungssystem, welches möglicherweise überbestimmt ist, und dessen numerische Lösung die erzwungene Lage der restlichen Glieder des parallelen Roboters beschreibt. Die Antriebskoordinaten ergeben sich dann direkt aus der Relativstellung einzelner aneinandergrenzender Glieder.

[0046] Zur Erstellung der Steuerungsgleichungen werden bevorzugt zwei Verfahrensschritte durchgeführt. Im ersten Schritt, der als Steuerungsanforderung bezeichnet wird, ist die Art des zu lösenden Problems, d. h. entweder des direkten oder des inversen kinematischen Problems, zu bestimmen. Im vorliegenden Ausführungsbeispiel wird das inverse kinematische Problem betrachtet. Ebenfalls Teil der Steuerungsanforderung ist die Festlegung für welche strukturelle Komponente des parallelen Roboters bei der Steuerung eine Vorgabe angeben wird. Durch die Wahl des inversen kinematischen Problems bezieht sich diese Vorgabe auf die Lage und/oder die Orientierung eines oder mehrer Glieder im Weltkoordinatensystem und somit auf eine Gleichung, die wenigstens einen Teil der Koordinaten des dem jeweiligen Glied zugeordneten Gliedkoordinatensystems mit Werten belegt. Diese Werte müssen jedoch für den Verfahrensschritt der Steuerungsanforderung keine Konstanten sein, vielmehr können stattdessen hierfür ganz oder teilweise Variablen eingesetzt werden, so dass parametrisierte Steuerungsgleichungen resultieren. In einem zweiten, nachfolgenden Schritt der Steuerungsvorgabe, der Steuerungseingabe, werden dann diese Variablen bzw. Parameter durch Zahlenwerte ersetzt, wobei die Steuerungseingabe für die Vorgabe einer Lagefolge mehrfach ausgeführt werden kann.

[0047] Ist stattdessen das direkte kinematische Problem zu lösen, so resultieren aus dieser Änderung in der Steuerungsanforderung auch Veränderungen in den parametrisierten Steuerungsgleichungen. In diesem Fall sind dann die Antriebskoordinaten zu beschreiben, d. h. im allgemeinen Fall Gelenkpositionen der als aktiv ausgewählten Gelenke und somit Relativstellungen der jeweils angrenzenden Glieder zueinander. Ist eines der beiden angrenzenden Glieder im Weltkoordinatensystem fixiert, so ergibt sich dann der besonders einfache Fall, dass die Koordinaten des angrenzenden Gliedkoordinatensystems bestimmte Wertevorgaben erhalten. Für den allgemeinen Fall werden sich jedoch je nach Gelenktyp bestimmte Wertevorgaben in den diesem Gelenk zugeordneten elementaren Zwangsbedingungen ergeben. Dies soll für den Fall von zwei Gliedkoordinatensystemen beschrieben werden, die gemäß Fig. 1E einen gemeinsamen Punkt auf einer Achse haben. Soll nun der Verschiebung des Punkts auf der Achse ein bestimmter Wert zugeordnet werden, so lässt sich dies in der Umformulierung der elementaren Zwangsbedingung wie folgt ausdrücken:

$$\vec{t}_k + R(\vec{\varphi}_k)\cdot\vec{p} = \vec{t}_j + R(\vec{\varphi}_j)\cdot\vec{p} + \mathrm{dist}\cdot(R(\vec{\varphi}_j)\cdot\vec{a}), \tag{8}$$

wobei der Variablen dist ein bestimmter Wert für die Verschiebung des Punktes $\vec{p}$ in Achsrichtung $\vec{a}$ zugeordnet ist. Für das vorliegende Beispiel stellt dies die parametrisierte Steuerungsgleichung dar, die sich aus der Steuerungsanforderung ergibt.

[0048] Werden dann für das direkte kinematische Problem in der Steuerungseingabe der Variablen dist bestimmte Wertevorgaben zugeordnet, so ergeben sich die Steuerungsgleichungen sowie durch die Lösung des Gesamtgleichungssystems aus Modell- und Steuerungsgleichungen wiederum die restlichen Koordinaten der den Gliedern zugeordneten Gliedkoordinatensysteme und somit die Position der Glieder selbst im Weltkoordinatensystem.

[0049] Durch eine mehrfach wiederholte Steuerungseingabe können Bahnbewegungen als Punktfolgen aufgenommen werden. Diese Punktfolgen können hinreichend fein gelegt bzw. interpoliert werden. Außerdem ist es möglich, die Punktfolgen mit einem Zeitindex zu versehen.

[0050] Die bisherigen Betrachtungen bezogen sich auf rein kinematische Fragestellungen, in einer Weitergestaltung der Erfindung ist es jedoch auch möglich, eine dynamische Betrachtung durchzuführen. Hierzu ist es zunächst notwendig, neben der Bestimmung der Bewegungsbahnen auch Geschwindigkeiten, Beschleuni-gungen und eventuelle höhere Ableitungen zu ermitteln. Zu diesem Zweck kann das Gesamtgleichungssystem nach den Antriebsvariablen abgeleitet werden. Auch mehrfache Ableitungen sind möglich. Zur Modellierung von Kräften und Drehmomenten werden nun für jedes Glied bzw. Gelenk weitere Daten, wie die Masse oder Trägheitstensoren, gespeichert. Ferner berücksichtigt eine Weiterentwicklung des erfindungsgemäßen Gedankens auch Elastizitäten der Glieder bzw. der Gelenke, welche durch zusätzliche bzw. modifizierte Gleichungen in der Modelleingabe berücksichtigt werden können.

[0051] Das Gleichungssystem, das sich durch die Modelleingabe und durch die Steuerungsvorgabe ergibt, das so genannte Gesamtgleichungssystem, wird numerisch gelöst. Hierzu ist es vorteilhaft, dieses gesamte Gleichungssystem als Nullstellenproblem zu formulieren und mit dem bekannten iterativen Verfahren, beispielsweise dem gedämpften Newton-Verfahren in Verbindung mit dem Householder-Verfahren, zu lösen.

[0052] Anhand eines in Fig. 3 gezeigten auf einen zweidimensionalen Fall beschränkten vereinfachten Beispiels eines parallelen Roboters soll der bevorzugte Verlauf des erfindungsgemäßen Verfahrens skizziert werden. Der dargestellte parallele Roboter weist vier Glieder auf, denen die Indizes 0–3 zugeordnet werden. Drei der Gelenke sollen als Rotationsgelenke ausgebildet sein, dies bedeutet im hier dargestellten ebenen Fall, dass die Relativbewegung der angrenzenden Glieder auf eine reine Rotation beschränkt ist. Das Gelenk zwischen dem Glied 0 und dem Glied 3 ist ein Translationsgelenk. Dies soll als aktives Gelenk einen Antrieb darstellen, der sich parallel zur x-Achse translatorisch bewegen kann. Ferner soll das Glied 0 im Weltkoordinatensystem unbewegbar sein, d. h. eine feste Position besitzen.

[0053] Zunächst sind für die Modelleingabe die zu den Gliedern gehörenden Gliedkoordinatensysteme zu generieren sowie die Position eines jeden Gliedes im zugeordneten Gliedkoordinatensystem anzugeben. Hierbei wird die Eingabe dadurch vereinfacht, dass alle Gliedkoordinatensysteme in der Ausgangslage mit dem Weltkoordinatensystem übereinstimmen. In einer vorteilhaften Ausgestaltung eines Computerprogramms mit Programmcodemitteln zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens gibt der Benutzer lediglich die Gelenkdaten an. Die Anzahl der Glieder, die Erzeugung der zugeordneten Gliedkoordinatensysteme und die Festlegung der Lageposition der Glieder in diesen Gliedkoordinatensystemen wird dann automatisiert übernommen. Außerdem ergeben sich aus der Eingage der Gelenkdaten auch die Verknüpfungen der Gliedkoordinatensysteme angrenzender Glieder, so dass in einer bevorzugten Umsetzung des erfindungsgemäßen Verfahrens auch die Modellgleichungen automatisiert bestimmt werden.

[0054] Entsprechend einer vorteilhaften Ausgestaltung ist für diese Schritte der Modelleingabe von Seiten des Benutzers lediglich die Anzahl der einzelnen Glieder des parallelen Roboters zu bestimmen, wobei diese vorzugsweise von Null an durchindiziert werden. Mit der Angabe der Gelenkpositionen im Weltkoordinatensystem und der zusätzlichen Angabe der Indizes der angrenzenden Glieder, d. h. des Gelenkkontexts, können dann die Gliedlagen in den Gliedkoordinatensystemen automatisch bestimmt werden. Vorteilhafterweise werden in diesem Eingabeschritt auch die restlichen Gelenkdaten, wie der Gelenktyp und die Gelenkpunkte und/oder einer oder mehrere Achsvektoren festgelegt. Für das obige Beispiel stellt sich dies dann wie folgt dar:
Gelenk zwischen Glied 0 und 1:
- Gelenktyp: Rotationsgelenk
- Gelenkkontext: 0; 1
- Gelenkpunkt: (40; 20)

Gelenk zwischen Glied 1 und 2:
- Gelenktyp: Rotationsgelenk
- Gelenkkontext: 1; 2
- Gelenkpunkt: (70; 70)

Gelenk zwischen Glied 2 und 3:
- Gelenktyp: Rotationsgelenk
- Gelenkkontext: 2; 3
- Gelenkpunkt: (115; 55)

Gelenk zwischen Glied 3 und 0:
- Gelenktyp: Translationsgelenk
- Gelenkkontext: 3; 0
- Gelenkpunkt: (115; 20)
- Achsenvektor: (1; 0)

[0055] Ausgehend von den Gelenkdaten werden wiederum aus den elementaren Zwangsbedingungen die Modellgleichungen für die jeweils an das entsprechende Gelenk angrenzenden Gliedkoordinatensysteme festgelegt. Aufgrund der Zweidimensionalität des Ausführungsbeispiels reduziert sich die Rotationsmatrix auf die Form

$$R(\vec{\varphi}) = \begin{pmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi \\ \sin\varphi & \cos\varphi \end{pmatrix}. \tag{9}$$

[0056] Für das vorliegende Beispiel ergibt sich hieraus Folgendes:
Rotationsgelenk zwischen Glied 0 und 1 erzeugt somit folgende Gleichung:

$$\vec{t}_0 + R(\vec{\varphi}_0) * \begin{pmatrix} 40 \\ 20 \end{pmatrix} = \vec{t}_1 + R(\vec{\varphi}_1) * \begin{pmatrix} 40 \\ 20 \end{pmatrix} \tag{10}$$

[0057] Rotationsgelenk zwischen Glied 1 und 2:

$$\vec{t}_1 + R(\vec{\varphi}_1) * \begin{pmatrix} 70 \\ 70 \end{pmatrix} = \vec{t}_2 + R(\vec{\varphi}_2) * \begin{pmatrix} 70 \\ 70 \end{pmatrix} \tag{11}$$

[0058] Rotationsgelenk zwischen Glied 2 und 3:

$$\vec{t}_2 + R(\vec{\varphi}_2) * \begin{pmatrix} 115 \\ 55 \end{pmatrix} = \vec{t}_3 + R(\vec{\varphi}_3) * \begin{pmatrix} 115 \\ 55 \end{pmatrix} \tag{12}$$

[0059] Translationsgelenk zwischen Glied 3 und 0:

$$\left(\vec{t}_3 - \vec{t}_0 + R(\vec{\varphi}_3) * \begin{pmatrix} 115 \\ 20 \end{pmatrix} - R(\vec{\varphi}_0) * \begin{pmatrix} 115 \\ 20 \end{pmatrix} \right) \times \left(R(\vec{\varphi}_3) * \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right) = \vec{0}. \tag{13}$$

$$\varphi_3 = \varphi_0 \tag{14}$$

[0060] Für die Steuerungsvorgabe soll das direkte kinematische Problem betrachtet werden, was im Rahmen der Steuerungsanforderung festgelegt wird.

[0061] Im Ausführungsbeispiel kann dies beispielsweise so realisiert werden, dass vom Benutzer das Glied 0 als fest im Weltkoordinatensystem definiert und das Translationsgelenk zwischen Glied 3 und 0 als aktives Gelenk festgelegt wird. Hierbei können noch die bestehenden Freiheitsgrade für die Koordinaten der beiden Gliedkoordinatensysteme, die an das Translationsgelenk angrenzen, bestimmt werden, so dass folgende parametrisierte Steuerungsgleichungen nach der Durchführung der Steuerungsanforderung (14)–(17) resultieren:

$$\vec{t}_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \tag{15}$$

$$\varphi_0 = 0 \tag{16}$$

[0062] Die Festsetzung des Glieds 0 könnte auch bereits mit den Modellgleichungen bestimmt werden, wenn es sich hierbei um einen durch die mechanische Struktur des parallelen Roboters bedingte Fixierung handelt.

[0063] Wird für die Bewegung entlang der x-Achse des Antriebs, d. h. des Translationsgelenks eine skalare Variable ANTRIEB eingeführt, so können die hieraus resultierenden parametrisierten Steuerungsgleichungen wie folgt dargestellt werden:

$$t_{3_x} = t_{0_x} + \cos(\varphi_0) * ANTRIEB \tag{17}$$

$$t_{3_y} = t_{0_y} + \sin(\varphi_0) * ANTRIEB \tag{18}$$

[0064] Wird nun die Variable ANTRIEB im Rahmen der Steuerungseingabe mit einem Wert versehen, so ergibt sich aus den damit vervollständigten Steuerungsgleichungen und den Modellgleichungen ein numerisch zu lösendes Gesamtgleichungssystem, das die Lage der Gliedkoordinatensysteme im Verhältnis zum Weltkoordinatensystem festlegt. Damit lassen sich auch die absolute Lage der Glieder im Weltkoordinatensystem oder ihre Relativlage und damit die Gelenkstellungen bestimmen.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Steuerung eines parallelen oder hybriden Roboters mit Gliedern und Gelenken, umfassend:
1.1 eine Modelleingabe, aus der Modellgleichungen resultieren;
1.2 eine Steuerungsvorgabe, aus der Steuerurgsgleichungen resultieren;
1.3 eine numerische Lösung des Gesamtgleichungssystems bestehend aus den Modellgleichungen und den Steuerungsgleichungen;
1.4 wobei die Modelleingabe folgende Verfahrensschritte umfasst:
1.4.1 jedem Glied wird ein Gliedkoordinatensystem zugeordnet, das sich so mit dem entsprechenden Glied im weiteren Bewegungsverlauf mitbewegt, dass die Lagekoordinaten des Glieds im zugeordneten Gliedkoordinatensystem unverändert bleiben
1.4.2 die Lagekoordinaten für ein Glied im Weltkoordinatensystem wird durch die Lage des zugeordneten Gliedkoordinatensystems bezogen auf das Weltkoordinatensystem bestimmt;
1.4.3 für jedes Gelenk werden aus den Gelenkdaten Zwangsbedingungen für die Bewegungsmöglichkeiten der zugeordneten Gliedkoordinatensysteme der an das jeweilige Gelenk angrenzenden Glieder bestimmt;
1.4.4 die Gesamtheit aller Zwangsbedingungen stellen die Modellgleichungen dar; und
1.5 wobei die Steuerungsvorgabe einen Verfahrensschritt umfasst, bei dem wenigstens einer ersten Koordinate eines ersten Gliedkoordinatensystems in Form einer Steuerungsgleichung ein absoluter Wert oder ein Wert relativ zu einer zweiten Koordinate eines zweiten Gliedkoordinatensystems zugeordnet wird.

2. Verfahren zur Steuerung eines parallelen oder hybriden Roboters nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Verfahrensschritt der Steuerungsvorgabe in eine Steuerungsanforderung und wenigstens eine Steuerungseingabe unterteilt wird, wobei bei der Steuerungsanforderung eine Auswahl zwischen dem direkten und dem inversen kinematischen Problem getroffen wird sowie die aktiven Strukturen des parallelen Roboters festgelegt werden, woraus parametrisierte Steuerungsgleichungen resultieren, deren Parameter im Verfahrensschritt der Steuerungseingabe mit Werten belegt werden.

3. Verfahren zur Steuerung eines parallelen oder hybriden Roboters nach wenigstens einem der Ansprüche 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Lagekoordinaten eines Glieds in seinem zugeordneten Gliedkoordinatensystem aus den Positionsvektoren der an das Glied angrenzenden Gelenke bestimmt werden.

4. Verfahren zur Steuerung eines parallelen oder hybriden Roboters nach wenigstens einem der Ansprüche 1–3, dadurch gekennzeichnet, dass alle Gliedkoordinatensysteme in der Ausgangsposition des parallelen Roboters mit dem Weltkoordinatensystem übereinstimmen.

5. Verfahren zur Steuerung eines parallelen oder hybriden Roboters nach wenigstens einem der Ansprüche 1–4, dadurch gekennzeichnet, dass die Gelenke als Kombination elementarer Zwangsbedingungen ausgedrückt werden.

6. Verfahren zur Steuerung eines parallelen oder hybriden Roboters nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass eine elementare Zwangsbedingung aus einer Gruppe von Bedingungen ausgewählt wird, welche die Verknüpfung zweier Gliedkoordinatensysteme durch einen gemeinsamen Punkt, durch eine übereinstimmende Orientierung im Weltkoordinatensystem, durch einen gemeinsamen Achsvektor, durch orthogonale Achsvektoren, durch einen Punkt eines ersten Gliedkoordinatensystems auf einer Achse eines zweiten Gliedkoordinatensystems und die Vorgabe von Werten für die eine Lage- oder Orientierungskoordinate eines Gliedkoordinatensystems im Weltkoordinatensystem umfasst.

7. Verfahren zur Steuerung eines parallelen oder hybriden Roboters nach wenigstens einem der Ansprüche 1–6, dadurch gekennzeichnet, dass das Gesamtgleichungssystem als Nullstellenproblem umgeformt wird.

8. Verfahren zur Steuerung eines parallelen oder hybriden Roboters nach wenigstens einem der Ansprüche 2–7 dadurch gekennzeichnet, dass ohne Wiederholung der Modelleingabe und/oder der Steuerungsanforderung die Steuerungseingabe mehrfach ausgeführt wird und nach jeder Steuerungseingabe das Gesamtgleichungssystem mit den aktuellen Steuerungsgleichungen numerisch gelöst wird.

9. Verfahren zur Steuerung eines parallelen oder hybriden Roboters nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass aus der Abfolge der numerischen Lösungen des Gesamtgleichungssystems, die jeweils einer bestimmten Steuerungseingabe zugeordnet werden, Bewegungsdaten wenigstens eines Glieds und/oder Gelenks umfassend die Bewegungsbahn, die Geschwindigkeit, die Beschleunigung und den Ruck, bestimmt werden.

10. Verfahren zur Steuerung eines parallelen oder hybriden Roboters nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass im Gesamtgleichungssystem zusätzliche und/oder modifizierte Gleichungen aufgenommen werden, die den Elastizitäten der Glieder und/oder der Gelenke zugeordnet werden.

11. Verfahren zur Steuerung eines parallelen oder hybriden Roboters nach einem der Ansprüche 1–10 dadurch gekennzeichnet, dass durch die Wahl der Steuerungsvorgabe eine Sollposition eines oder mehrerer Glieder und/oder Gelenke im Weltkoordinatensystem festgelegt wird und aus der Lösung des Gesamtgleichungssystems Antriebskoordinaten in Form von Gelenkstellungen berechnet werden.

12. Verfahren zur Steuerung eines parallelen oder hybriden Roboters nach einem der Ansprüche 1–11 dadurch gekennzeichnet, dass durch die Wahl der Steuerungsvorgabe für wenigstens eine Gelenkstellung Antriebskoordinaten vorgegeben werden und aus der Lösung des Gesamtgleichungssystems für ein oder mehrere Glieder und/oder Gelenke die resultierenden Lagepositionen und/oder Orientierungen im Weltkoordinatensystem festgelegt werden.

13. Verfahren zur Steuerung eines parallelen oder hybriden Roboters nach einem der Ansprüche 1–12 dadurch gekennzeichnet, dass die Modelleingabe und/oder die Steuerungsvorgabe und/oder die Lösung des Gesamtgleichungssystems mittels einer dem parallelen Roboter zugeordneten Steuerungseinrichtung durchgeführt werden.

14. Verfahren zur Steuerung eines parallelen oder hybriden Roboters nach wenigstens einem der Ansprüche 1–13, dadurch gekennzeichnet, dass aus der numerischen Lösung des Gesamtgleichungssystems Steuerungssignale zur Ansteuerung der aktiven Gelenke des parallelen Roboters berechnet werden.

15. Verfahren zur Steuerung eines parallelen oder hybriden Roboters nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, dass die berechneten Steuerungssignale von einer Steuerungseinheit erzeugt und auf die aktiven Gelenke übertragen werden.

16. Computerprogramm mit Programmcode-Mitteln, um die Verfahrensschritte gemäß wenigstens einem der Ansprüche 1–15 durchzuführen, wenn das Programm auf einem Computer ausgeführt wird.

17. Computerprogramm mit Programmcode-Mitteln gemäß Anspruch 16, die auf einem computerlesbaren Datenträger gespeichert sind.

Es folgen 3 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

Fig 1a

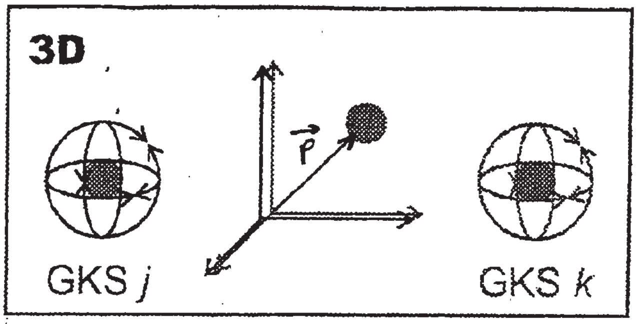


Fig. 1b

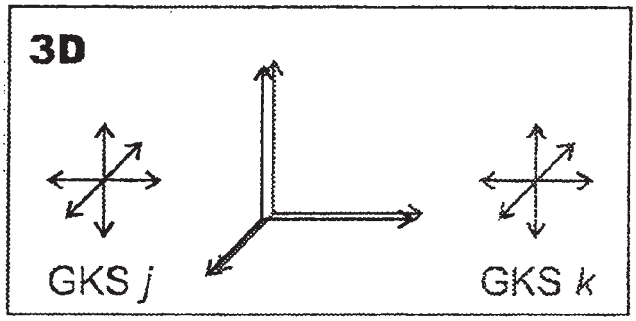


Fig. 1c

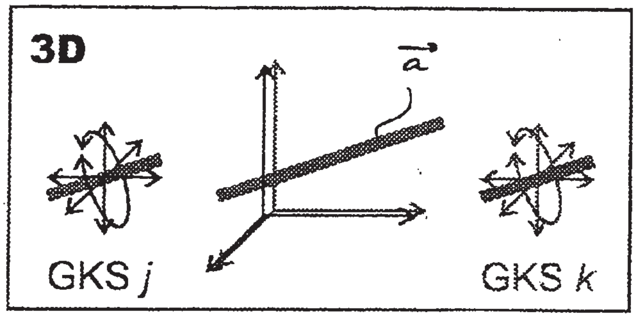


Fig. 1d

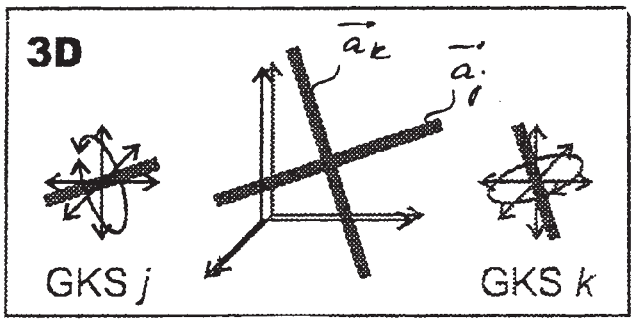


Fig. 1e

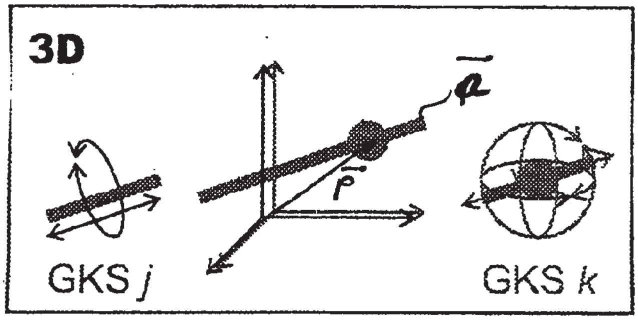


Fig. 2a

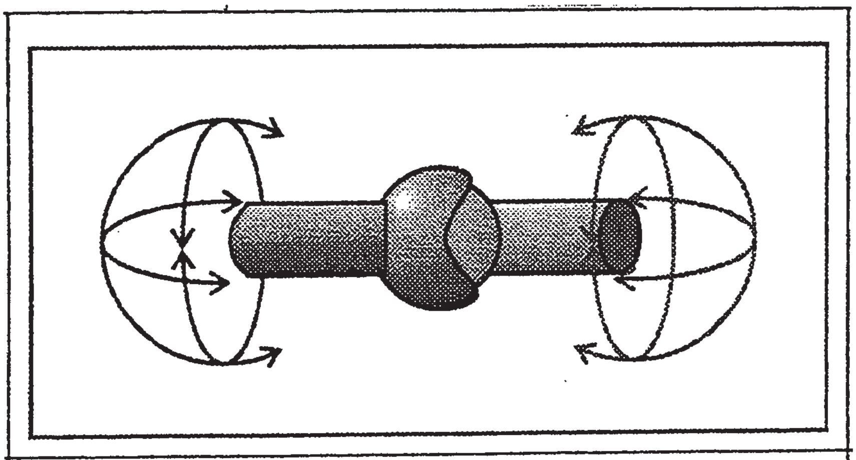


Fig. 2b

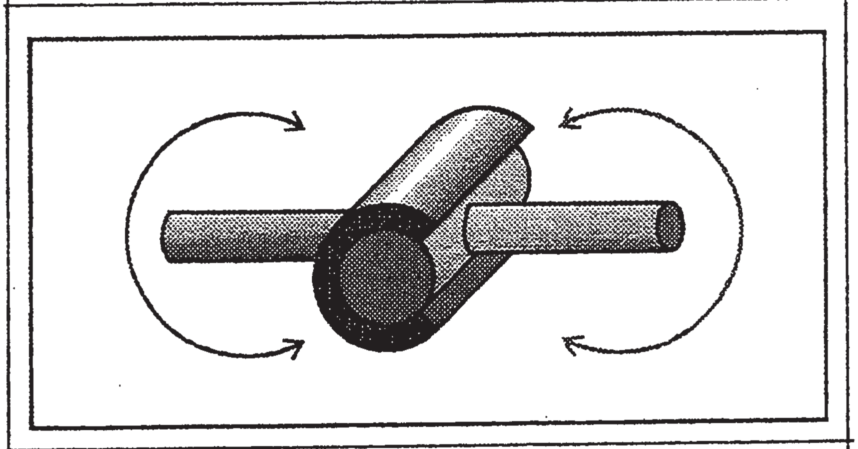


Fig. 2c

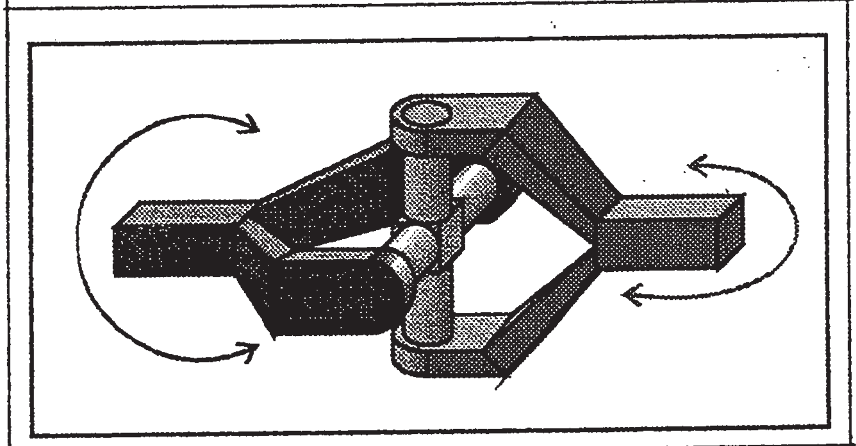


Fig. 2d

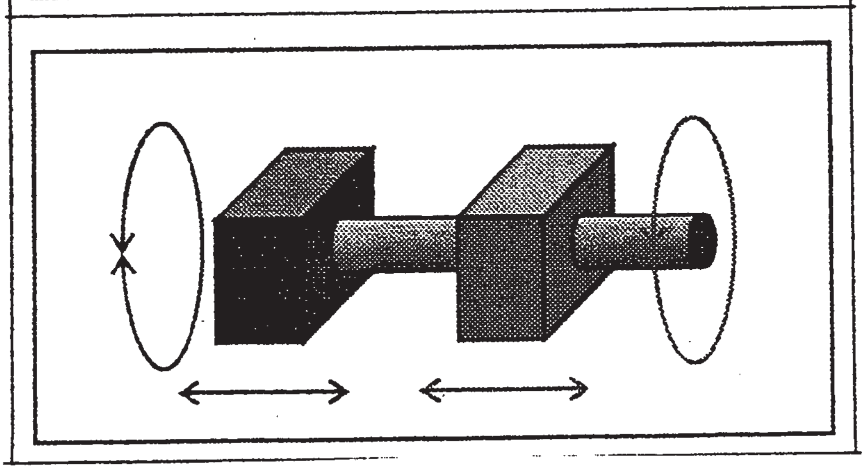
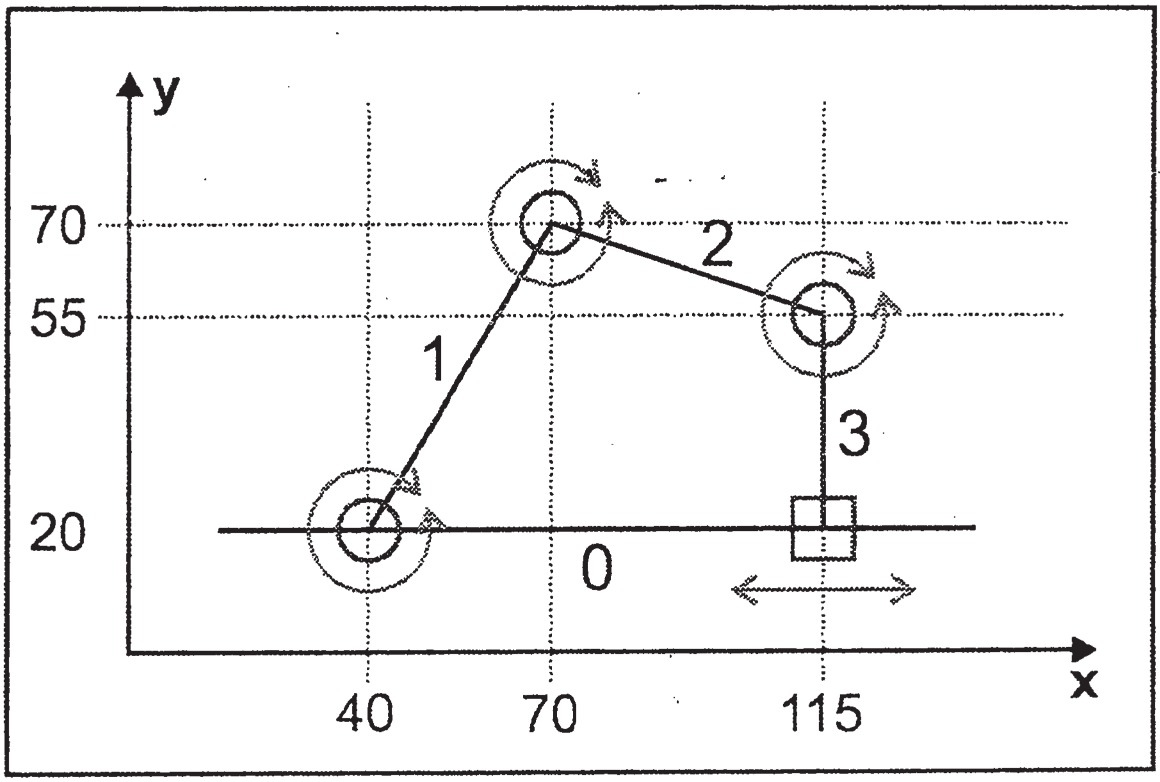


Fig. 3



DE 102004026707 A1

Anmeldeland:DE
Anmeldenummer:102004026707
Anmeldedatum:28.05.2004
Veröffentlichungsdatum:22.12.2005
Hauptklasse:B25J 9/18
MCD-Nebenklasse:B25J 9/18
MCD-Nebenklasse:G05B 19/408
ECLA:G05B 19/408 C
Entgegenhaltung (PL):DE 000010131241 A1
Entgegenhaltung (PL):US 000004698572 A
Entgegenhaltung (PL):WO 001999055497 A1
Entgegenhaltung (NPL):HAYATI,S., MIRMIRANI,M.: "Improving the Absolute Positioning Accurary of Robot Manipulators", In: Journal of Robotic Systems, 2(4), 397-413 (1985)
Entgegenhaltung (NPL):LUH,J.Y.S., ZHENG,Y.-F.: "Computation of Input Ge-neralized Forces for Robots with Closed Kinematic Chain Mechanisms", In: IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. RA 1, No.2, June 1985, S.95- 103
Entgegenhaltung (NPL):MEIER,C., STELZER,J.: "Koordinatentransformationen für Bahnsteuerung und schnelle Sensorsignalversteuerungen", In: Siemens Forsch.-und Entwickl.-Ber., Bd.14 (1985) Nr.5, S.224-229
Entgegenhaltung (NPL):NANUA, P., WALDRON, K.J., MURTHY,V.: "Direct Kinematic Solution of a StewartPlatform", In: IEEE Transactionn on Robotics and Automation, Vol.6, No.4, August 1990, S.434-444
Entgegenhaltung (NPL):SMIAROWSKI,A., ANDERSON,J.N.: "On Jacobians for Robots Containing Closed Kinematic Chains". In: Proceedings of the Twentieth Southeastern Symposi-um on System Theory, 20-22 March 1988, Page(s): 464-467
Entgegenhaltung (NPL):THOMAS,U., MACIUSZEK,I., WHAL,F.M.: "A Unified Notion for Serial, Parallel, and Hybrid Kinematic Structures", In: Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 2002, S.2868-2873
Entgegenhaltung (NPL):YAMAWAKI,T., MORI,O., OMATA,T.: "Nonholonomic Dy- namic Rolling Control of Reconfigurable 5R Closed Kinematic Chain Robot with Passive Joints", In: Proceedings of the 2003 IEEE International Confer-ence on Robotics and Automation, Sept. 14-19, 2003, S. 4054-4059, THOMAS,U., MACIUSZEK,I., WHAL,F.M.: "A Unified No-
Entgegenhaltung (NPL):YAMAWAKI,T., MORI,O., OMATA,T.: "Nonholonomic Dynamic Rolling Control of Reconfigurable 5R Closed Kinematic Chain Robot with Passive Joints", In: Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Sept. 14-19, 2003, S. 4054-4059
Erfinder:Henrich, Dominik, Prof. Dr., 95447 Bayreuth, DE
Erfinder:Kuhn, Stefan, 55743 Idar-Oberstein, DE
Erfinder:Sauer, Bernd, Prof. Dr.-Ing., 67657 Kaiserslautern, DE
Anmelder:Technische Universität Kaiserslautern, 67663 Kaiserslautern, DE

[DE]Verfahren zur Steuerung von parallelkinematischen und hybriden Maschinen

[EN]Hybrid robot controlling method, involves determining obligating conditions for motion possibilities of link coordinating system for each link, and assigning value relative to another coordinating system to former system

[DE]

Verfahren zur Steuerung eines parallelen oder hybriden Roboters mit Gliedern und Gelenken, umfassend eine Modelleingabe, aus der Modellgleichungen resultieren, eine Steuerungsvorgabe, aus der Steuerungsgleichungen resultieren sowie eine numerische Lösung des Gesamtgleichungssystems, bestehend aus den Modellgleichungen und den Steuerungsgleichungen, wobei die Modelleingabe folgende Verfahrensschritte umfasst: DOLLAR A - jedem Glied wird ein Gliedkoordinatensystem zugeordnet, das sich so mit dem entsprechenden Glied im weiteren Bewegungsverlauf mitbewegt, dass die Lagekoordinaten des Glieds im zugeordneten Gliedkoordinatensystem unverändert bleiben; DOLLAR A - die Lagekoordinaten für ein Glied im Weltkoordinatensystem wird durch die Lage des zugeordneten Gliedkoordinatensystems, bezogen auf das Weltkoordinatensystem, bestimmt; DOLLAR A - für jedes Gelenk werden aus den Gelenkdaten Zwangsbedingungen für die Bewegungsmöglichkeiten der zugeordneten Gliedkoordinatensysteme der an das jeweilige Gelenk angrenzenden Glieder bestimmt; DOLLAR A - die Gesamtheit aller Zwangsbedingungen stellen die Modellgleichungen dar; DOLLAR A und wobei die Steuerungsvorgabe einen Verfahrensschritt umfasst, bei dem wenigstens einer ersten Koordinate eines ersten Gliedkoordinatensystems in Form einer Steuerungsgleichung ein absoluter Wert oder ein Wert relativ zu einer zweiten Koordinate eines zweiten Gliedkoordinatensystems zugeordnet wird.

[EN]

The method involves assigning a link coordinating system to every link of a robot. Position coordinates for a link are determined by a position of the assigned system in relation with an earth coordinating system. Obligating conditions are determined for motion possibilities of the assigned system for each link. An absolute value or value relative to another coordinating system, is assigned to the former coordinating system. An independent claim is also included for a computer program with program-code to execute a procedure for controlling a hybrid robot.

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Steuerung von parallelkinematischen Maschinen und hybriden Maschinen sowie ein Computerprogramm mit Programmcodemitteln und eine Steuerungseinheit zur Durchführung des Verfahrens.

[0002] Unter parallelkinematischen Maschinen werden Roboter verstanden, die parallel angeordnete Gliedketten umfassen. Hybriden Mechanismen weisen eine Kombination aus seriellen und parallelen Gliedketten auf. In der vorliegenden Anmeldung wird für solche parallelkinematischen Maschinen der äquivalente Ausdruck „paralleler Roboter" verwendet. Die parallel angeordneten Gliedketten bestehend aus Gliedern und Gelenken können beispielsweise durch die Verwendung von Schubgelenken längenveränderlich ausgebildet sein. Eine Arbeitsplattform, die aus verschiedenen Winkeln durch solche Gliedketten abstützt wird, kann nur dann linear bewegt werden, wenn wenigstens zwei Gliedketten und im allgemeinen Fall eine Vielzahl von Gliedketten in ihrer Längenausdehnung verändert werden. In einer anderen Ausgestaltung eines parallelen Roboters werden die längenveränderlichen Gliedketten durch längenkonstante Gliedketten ersetzt, deren Basisanlenkpunkte translatorisch verschoben werden, so dass wiederum durch das Zusammenspiel der Bewegungen der einzelnen Gliedketten die Arbeitsplattform in ihrer Position bzw. Orientierung verändert werden kann. Beispiele für parallele Roboter sind Hexapoden, die eine Bewegung im Raum unter Ausnutzung aller sechs Freiheitsgrade erlauben. Im Vergleich hierzu sind Tripoden auf drei Antriebe und drei Freiheitsgrade beschränkt.

[0003] Im Allgemeinen unterscheiden sich demnach parallele Roboter von seriellen Maschinen dadurch, dass Glied-Gelenk-Strukturen nebenläufig angeordnet sind, wobei jede der Glied-Gelenk-Strukturen aktiver oder passiver Natur sein kann. Die Bewegung eines Gliedpunktes, an dem beispielsweise eine Arbeitsplattform befestigt ist, setzt sich meist aus einer Mehrzahl von parallelen Glied-Gelenkbewegungen zusammen, wozu typischerweise eine Vielzahl von Aktoren zusammenwirken müssen.

[0004] Aus diesem Grund wird an die Steuerung bzw. die einer Steuerung zugrunde liegende Modellierung eines parallelen Roboters im Vergleich zu einer seriellen Maschine erweiterte Anforderungen gestellt. Im Allgemeinen wird zwischen zwei Steuerungsanforderungen, dem inversen kinematischen Problem und dem direkten kinematischen Problem, unterschieden. Beim inversen kinematischen Problem wird für einen Gliedpunkt, typischerweise die Arbeitsplattform, eine bestimmte Bewegungsbahn vorgegeben, etwa in der Form von Lagefolgen, wobei die zu Realisierung dieser Bewegungsbahn notwendigen Antriebskoordinaten der Aktuatoren zu bestimmen sind. Dagegen ist für das direkte kinematische Problem die Bewegung eines Gliedpunktes im Weltkoordinatensystem ausgehend von vorgegebenen Antriebskoordinaten zu berechnen.

[0005] Bisher sind drei unterschiedliche Gruppen von Modellierungsverfahren für parallele Roboter bekannt geworden. In der ersten Gruppe wird der parallele Roboter als ein Zusammenschluss von seriellen Ketten betrachtet, wodurch es möglich ist, die Verfahren zur Modellierung von seriellen Maschinen mittels des Denavit-Hartenberg-Prinzips anzuwenden. Diesbezüglich wird auf die Publikation Denavit, J. u. R. S. Hartenberg: A kinematic notation for lower pair mechanisms based on matrices, Journal of Applied Mechanics, Trans. of. the ASME, June 1955 verwiesen. Die einzelnen Ketten werden separat behandelt und in Form von Zwangsbedingungen, die die Bewegungsmöglichkeiten der einzelnen Ketten beschränken, zusammengeschlossen. Diese Vorgehensweise ist insofern als unnatürlich anzusehen, da der parallele Roboter eine Einheit bildet, die aus Gliedern und Gelenken und nicht aus der Verbindung einzelner serieller Ketten besteht. Hierdurch wird eine standardisierte Betrachtungsweise erschwert.

[0006] Eine zweite Gruppe von Verfahren basiert auf der Unterteilung des parallelen Roboters in einzelne Modulgruppen. In jeder Modulgruppe wird der ebene Zusammenhang zwischen zwei aneinandergrenzenden, durch ein Gelenk verbundene Glieder betrachtet, wobei die kinematischen Eigenschaften der Modulgruppe in Form eines Parametersatzes festgelegt sind. Hierbei werden Variablen und definierte Randbedingungen in Form von abhängigen Gleichungen (Gliedergruppenkonzept) formuliert und so ein Zusammenhang zwischen bestimmten Ein- und Ausgabewerten festgelegt. In einer Realisierung, die in der VDI-Richtlinie 2729, Modulare kinematische Analyse ebener Gelenkgetriebe mit Dreh- und Schubgelenken, Beuth-Verlag GmbH, 10772 Berlin beschrieben wird, werden die Modulgruppen als Baugruppen bezeichnet. Als nachteilig bei einer solchen Vorgehensweise ist die aus dem Modell resultierende Einschränkung der Relativbewegung der Glieder auf ebene Bewegungen anzusehen.

[0007] Eine dritte Gruppe von Verfahren teilt einen parallelen Roboter in mehrere unabhängige Maschen in der Form von geschlossenen Vektorzügen auf. Innerhalb einer solchen geschlossenen Masche ergibt sich eine

Abfolge von Gliedern und Gelenken, wobei entlang einer festgelegten Maschenrichtung ein Gelenk jeweils das angrenzende Folgeglied in seinen Bewegungsmöglichkeiten einschränkt. Nebenläufig werden also zwei Bedingungen betrachtet. Zum einen die Geschlossenheitsbedingung innerhalb einer Masche, zum anderen die Bewegungseinschränkungen für ein Glied innerhalb der Masche, das jeweils einem Gelenk nachfolgt. Zusätzlich ist zu beachten, dass vor Anwendung des Verfahrens zunächst die geschlossenen Vektorzüge bzw. unabhängigen Maschen ermittelt werden müssen, wofür es aufgrund der unterschiedlichen Bauformen der parallelen Roboter kein einheitliches Vorgehen gibt. Ferner ist für hybride Mechanismen die Formulierung einer Geschlossenheitsbedingung nicht möglich.

[0008] Der vorliegenden Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine Steuerung für parallele Roboter anzugeben, wobei das Steuerungsverfahren für eine Vielzahl unterschiedlicher Bauformen von parallelen Robotern auch für solche mit hybriden Mechanismen einheitlich gestaltet sein soll. Das Steuerungsverfahren sollte auf einer standardisierten Modellierung für unterschiedliche Arten von parallelkinematischen Maschinen beruhen, mit der es möglich ist, das Kinematikproblem, und zwar das inverse kinematische Problem wie auch das direkte kinematische Problem zu lösen. Steuerungsanforderungen sollten wiederum als Teil dieses Modells beschreibbar sein, so dass hieraus unmittelbar Sollpositionen bzw. Sollstellungen für die Antriebe resultieren, die dann wiederum in Ansteuerungssignale für die Aktoriken umgesetzt werden können. Für die einheitliche Modellierung sollten die voranstehend beschriebene Nachteile der bekannten Verfahren überwunden werden und insbesondere sollte eine einheitliche Betrachtung des parallelen Roboters sowie eine Behandlung von räumlichen Gelenken möglich sein, wobei die Modelleingabe und die Eingabe von Steuerungsanforderungen möglichst einfach und standardisiert sein sollten.

[0009] Zur Lösung dieser Aufgabe haben die Erfinder erkannt, dass sich die strukturelle Aufteilung eines parallelen Roboters in Glieder und Gelenke auch in der Modellbeschreibung widerspiegeln muss, d. h. jedes Glied und jedes Gelenk wird einheitlich behandelt. Aufgrund dieser Standardisierung ergibt sich die Möglichkeit parallele Roboter mit einer beliebigen Anzahl von Gliedern und unterschiedlichster strukturellen Anordnung zu modellieren. Insbesondere eine Beschränkung auf eine ebene Relativbewegung aneinandergrenzender Einzelglieder ist nicht mehr notwendig.

[0010] Im erfindungsgemäßen Verfahren lassen sich die Verfahrensschritte der Modelleingabe und der Steuerungsvorgabe unterscheiden. Unter der Modelleingabe wird die Erstellung von Modellgleichungen verstanden, wobei die Gesamtheit der Modellgleichungen die prinzipielle Bewegungsmöglichkeit des parallelen Roboters beschreiben, d. h. es wird keine Unterscheidung zwischen aktiven und passiven Gelenken vorgenommen. Die Steuerungsvorgabe lässt sich wiederum in eine Steuerungsanforderung und eine Steuerungseingabe unterteilen. Dabei wird unter der Steuerungsanforderung die Festlegung verstanden, ob das direkte oder das inverse kinematische Problem zu lösen ist. Aus der Steuerungsanforderung resultieren parametrisierte Steuerungsgleichungen, die in Verbindung zur erfindungsgemäßen Modelleingabe stehen, was im Folgenden noch detailliert dargelegt wird. Die Steuerungseingabe bezeichnet wiederum den Verfahrensschritt bei dem die Parameter der parametrisierten Steuerungsgleichung festgelegt werden, so dass hieraus Steuerungsgleichungen resultieren, die zusammen mit den Modellgleichungen ein Gesamtgleichungssystem ergeben. Dabei führt die numerische Lösung dieses Gesamtgleichungssystems je nach Art der Steuerungsanforderung entweder zur Lösung des inversen oder des direkten kinematischen Problems.

[0011] Ist beispielsweise das inverse kinematische Problem für eine bestimmte Sollbahn einer Arbeitsplattform zu lösen, so ist wiederum für jede der Sollpositionen in einer Lagefolge eine separate Steuerungseingabe vorzunehmen, während im allgemeinen Fall die Modelleingabe sowie die Steuerungsanforderung und damit die Modell- und die parametrisierten Steuerungsgleichungen nur einmalig erstellt werden müssen.

[0012] Im Einzelnen wird für die standardisierte Modelleingabe jedem der Glieder des parallelen Roboters ein lokales Koordinatensystem zugeordnet, das im Folgenden als Gliedkoordinatensystem bezeichnet wird. Bevorzugt wird für die Gliedkoordinatensysteme kartesische Koordinatensysteme, wobei jedoch auch hiervon abweichende schiefwinklige Koordinatensysteme möglich sind. Jedes der einem Glied zugeordneten Gliedkoordinatensysteme bewegt sich mit diesem während des gesamten Bewegungsverlaufs mit. Folglich bleiben die Lagekoordinaten des Gliedes in seinem zugeordneten Gliedkoordinatensystem konstant. Im einfachsten Fall wird ein Glied als Verbindung zwischen zwei Gelenken betrachtet, wodurch die Lagekoordinaten eines Gliedes durch die Positionsvektoren der beiden angrenzenden Gelenke bestimmt werden. Ein Glied kann aber auch die Verbindung für mehr als zwei Gelenke bilden, so dass für diesen allgemeinen Fall bevorzugt für alle einem Glied zugeordneten Gelenke die Positionsvektoren im zugeordneten Gliedkoordinatensystem des Glieds angegeben werden, um dessen Lagekoordinaten festzulegen. Wie dargestellt bleibt diese Festlegung konstant und muss nur einmalig vorgenommen werden. Demnach wird in der vorliegenden Anmeldung unter einem

Seite 5 --- ()

Glied die starre Verbindung von Gelenken verstanden, d. h. alle beweglichen Strukturen des parallelen Roboters werden den Gelenken zugeordnet.

[0013] Zur Festlegung der Bewegung eines Glieds im Weltkoordinatensystem dienen die Koordinaten des Gliedkoordinatensystems relativ zum Weltkoordinatensystem. Im Dreidimensionalen sind dies die den sechs Freiheitsgraden des Gliedkoordinatensystems zugeordneten translativen und rotativen Koordinaten. Zur Vereinfachung der Modelleingabe wird bevorzugt, dass in der Ausgangsposition des parallelen Roboters zunächst alle Gliedkoordinatensysteme mit dem Weltkoordinatensystem zusammenfallen.

[0014] Eine bevorzugten Ausgestaltung der Modelleingabe umfasst einen Verfahrensschritt, bei dem die Gliedkoordinatensysteme generiert werden und die Glieder in diesen Gliedkoordinatensystemen bezüglich ihrer Lagekoordinaten festgelegt werden. Mit dieser Eingabe ist zunächst noch kein Zusammenhang zwischen den einzelnen Gliedern hergestellt, d. h. alle Gliedkoordinatensysteme können sich noch frei im Weltkoordinatensystem bewegen. Zur Vervollständigung der Modelleingabe werden deshalb die aus den Gelenken resultierenden Zwangsbedingungen wie folgt in das Modell eingebracht: Für jedes Gelenk werden Gelenkdaten eingeben. Diese Gelenkdaten umfassen den Gelenktyp, den Gelenkkontext und die Gelenkpunkte und/oder einer oder mehrere Achsvektoren. Unter dem Begriff Gelenktyp wird die Art eines Gelenks, beispielsweise ein Kugelgelenk oder ein Schubgelenk, verstanden. Der Gelenkkontext legt wiederum fest, welche Glieder mit dem vorliegenden Gelenk verbunden sind. In Abhängigkeit des Gelenktyps wird festgelegt, ob Gelenkpunkte und/oder Achsvektoren bestimmt werden müssen, wobei sich die hierfür notwendigen Koordinatenwerte aus der Lage und Orientierung des Gelenks in der Ausgangsposition ergeben. Zu beachten ist, dass die Gelenkpunkte und/oder Achsvektoren, die wiederum die Wirkung des Gelenks auf die angrenzenden Glieder beschreiben, aus der Sicht des jeweiligen Gliedes in seinem zugeordneten Gliedkoordinatensystem als vektorielle Konstanten aufzufassen sind.

[0015] Jede aus den Gelenkdaten resultierende Zwangsbedingung führt wiederum zu einer Gleichung, die wenigstens einen Teil der Koordinaten der an das jeweilige Gelenk angrenzenden Gliedkoordinatensysteme verbindet, wobei in der vorliegenden Anmeldung eine solche Gleichung als Modellgleichung bezeichnet wird. Alle Modellgleichungen zusammen ergeben wiederum die grundsätzliche Bewegungsmöglichkeit des parallelen Roboters.

[0016] Wird nun in einem weiteren Verfahrensschritt zur Modellierung des parallelen Roboters die Steuerungsvorgabe hinzugenommen, so kann über die Steuerungsanforderung und die Steuerungseingabe das System der Steuerungsgleichungen erstellt werden. Für die Steuerungsanforderung wird festgelegt, ob das direkte oder das inverse kinematische Problem zu lösen ist und welches die aktiven Gelenke oder Glieder sind, für die bei der Steuerung Vorgaben gemacht werden. In Abhängigkeit dieser Festlegung resultieren parametrisierte Steuerungsgleichungen. Die Parameter werden dann bei der Steuerungseingabe mit Werten belegt.

[0017] Für das inverse kinematische Problem werden den freien Lagevariablen (Position und/oder Orientierung) wenigstens eines Glieds bestimmte Werte zugeordnet. Im erfindungsgemäßen Verfahren repräsentiert ein zugeordnetes Gliedkoordinatensystem die Lage eines Glieds, so dass für das inverse kinematische Problem entsprechend eine oder mehrere Koordinaten wenigstens eines Gliedkoordinatensystems gesetzt werden. Für das direkte kinematische Problem haben die parametrisierten Steuerungsgleichungen eine solche Struktur, dass erfindungsgemäß bei der Steuerungseingabe jeweils zwei aneinandergrenzende Gliedkoordinatensysteme in Zusammenhang zueinander gesetzt werden, d. h. es wird ein Relativwert, der auch variabel sein kann, für einen Winkel oder eine Distanz, jeweils ausgedrückt durch Koordinaten der beiden Gliedkoordinatensysteme vorgeben.

[0018] Die Steuerungsgleichungen führen in Verbindung mit den Modellgleichungen, bis auf einige Spezialfälle, zu einer bestimmten Stellung des parallelen Roboters, wobei zur Erzeugung einer Bewegungsfolge der Verfahrensschritt der Steuerungseingabe mehrmals wiederholt werden kann, d. h. die resultierenden Steuerungsgleichungen werden durch unterschiedliche Vorgaben für die Parameter der parametrisierten Steuerungsgleichungen schrittweise verändert. Die voranstehend genannte Einschränkung wonach der Fall auftreten kann, dass die Modellgleichungen mehr als eine Lösung haben, also unterbestimmt sind, ist in der Praxis deshalb meist unbeachtlich, da von einer bestimmten Ausgangsstellung der Glieder ausgegangen wird von der aus sich die Bewegung entwickelt. Der Folgebewegungsschritt ausgehend von einer bekannten Lage wird so hinreichend klein ausgeführt, dass weitere, theoretische mögliche Lösungen des Modellgleichungssystems zwar existieren, jedoch insbesondere bei einer numerischen Lösung des Modellgleichungssystems nicht als erstes aufgefunden werden. Dennoch sind bestimmte mechanische Strukturen paralleler Roboter denkbar, bei denen ein Umklappen von einer ersten Stellung in eine zweite Stellung möglich ist. Solche, durch die mecha

Seite 6 --- ()

nische Struktur bedingte Uneindeutigkeit würden sich dann auch auf die Modellgleichungen übertragen und zu zwei oder mehreren möglichen Lösungen führen, wobei es eine Frage des angewandten numerischen Verfahrens ist, ob diese auch aufgefunden werden. Außerdem kann der Fall auftreten, dass die Verbindung von Steuerungsgleichungen und Modellgleichungen zu einem überbestimmten Gesamtgleichungssystem führt.

[0019] Aufgrund der im Allgemeinen auftretenden Nichtlinearitäten des Gesamtgleichungssystems werden zur Lösung lediglich numerisch basierte Iterationsverfahren in Frage kommen. Besonders bevorzugt wird, das Gesamtgleichungssystem als Nullstellenproblem umzuformulieren. Als geeignete numerische Verfahren hat sich das gedämpfte Newton-Verfahren in Verbindung mit dem Householder-Verfahren erwiesen.

[0020] Aufbauend auf der erfindungsgemäßen Modellbeschreibung offenbart das Steuerungsverfahren auch die Erzeugung von Steuerungsbefehlen bzw. Steuerungssignalen zur Bewegungsführung der Aktoriken des parallelen Roboters ausgehend von der Lösung des Kinematikproblems. Das Steuerungsverfahren und die hiermit verbundene Modellgenerierung kann in einem dem parallelen Roboter zugeordneten Steuerungsgerät durchgeführt werden, mit welchem sowohl die Benutzerschnittstelle wie auch die Schnittstelle zum parallelen Roboter selbst realisiert werden kann.

[0021] Das Steuerungsverfahren oder Teile davon können in Form eines Computerprogramms mit Programmcode-Mitteln auf einem Computer ausgeführt werden, wobei hierdurch Gliedpositionen oder Gelenkkoordinaten bestimmt werden, die wiederum durch eine weitere, direkt einem parallelen Roboter zugeordnete Steuerungseinheit übermittelt werden. Ferner ist ein Computerprogramm mit Programmcode-Mitteln offenbart, das das erfindungsgemäße Steuerungs- und Modellierungsverfahren realisiert und welches auf einem computerlesbaren Datenträger abgespeichert ist.

[0022] Die Erfindung wird anhand der nachfolgenden Figuren genauer beschrieben.

[0023] Fig. 1a-e stellen elementare Zwangsbedingungen dar.

[0024] Fig. 2a-d zeigen Beispiele für reale Gelenke.

[0025] Fig. 3 zeigt ein zweidimensionales Beispiel eines parallelen Roboters.

[0026] Für die Modelleingabe eines zu steuernden parallelen Roboters wird erfindungsgemäß für jedes der Glieder des Roboters ein zugeordnetes Gliedkoordinatensystem erzeugt. Bevorzugt wird hierbei davon ausgegangen, dass in der Ausgangsposition alle Gliedkoordinatensysteme mit dem Weltkoordinatensystem zusammenfallen. Als Glied wird jene strukturelle Einheit angesehen, die durch angrenzende Gelenke begrenzt wird. Demnach kann einem Glied in seinem zugeordneten Gliedkoordinatensystem durch die Angabe der Ortsvektoren der begrenzenden Gelenke bezüglich seiner Lagekoordinaten festgelegt werden. Diese werden sich in den Koordinaten des zugeordneten Gliedkoordinatensystems während des gesamten Bewegungsverlaufes nicht mehr verändern. Hiervon zu unterscheiden ist jedoch die Betrachtung eines Glieds vom Weltkoordinatensystem aus gesehen, wobei zur Beschreibung der Gliedposition und Orientierung eines Glieds im Weltkoordinatensystem die Relativkoordinaten zwischen dem Weltkoordinatensystem und dem zugeordneten Gliedkoordinatensystem herangezogen werden.

[0027] Für die Eingabe der Ausgangsposition ist es am einfachsten, zunächst die Anzahl der Glieder des parallelen Roboters einzugeben, wobei dann vorteilhafterweise jedes der Glieder indiziert wird. Danach kann die Lage der einzelnen Gelenke im Weltkoordinatensystem zusammen mit den Indizes der angrenzenden Glieder angegeben werden, in der vorliegenden Anmeldung wird dieser Verfahrensschritt als Angabe des Gelenkkontexts bezeichnet, wodurch dann auch automatisch die Lagekoordinaten der Glieder in ihren Gliedkoordinatensystemen festgelegt sind.

[0028] Zur Betrachtung der Lageposition eines Gliedes in Weltkoordinaten wird die Position und Orientierung des zugeordneten Gliedkoordinatensystems in Bezug auf das Weltkoordinatensystem verwendet. Eine Möglichkeit dies auszudrücken, besteht in der Angabe eines Translationsvektors, der die Angabe des Ursprungspunkts eines Gliedkoordinatensystems im Weltkoordinatensystem ermöglicht, wobei dieser Vektor für den dreidimensionalen Fall drei Koeffizienten aufweist. Entsprechend sind dann zur Bestimmung der Orientierung des Gliedkoordinatensystems die drei Eulerwinkel zuzuordnen. Im Allgemeinen lässt sich für den räumlichen Fall dann ein Vektor &ngr;→ aus einem Gliedkoordinatensystem durch folgende Gleichung &ngr;→' = t← + R(&phgr;→)·&ngr;→(1)

Seite 7 --- ()

in einen Vektor &ngr;→' des Weltkoordinatensystems transformieren, wobei t→ den Translationsvektor und R(&phgr;→) eine Matrix repräsentiert, die im Allgemeinen als Variablen die drei Euler-Winkel &phgr;$_x$, &phgr;$_y$ und &phgr;$_z$ aufweist und sich im dreidimensionalen Fall wie folgt darstellt:

[0029] Für die bevorzugte Ausgestaltung, wonach bei der Ausgangsposition alle Gliedkoordinatensysteme mit dem Weltkoordinatensystem übereinstimmen, werden die drei Koordinaten des Translationsvektors t→ und die drei Euler-Winkel den Wert 0 annehmen, was sich dann im Bewegungsverlauf ändert.

[0030] Durch die Eingabe der Gelenkdaten des jeweiligen parallelen Roboters werden die angrenzenden Gliedkoordinatensysteme in ihren Bewegungsmöglichkeiten relativ zueinander beschränkt, wobei sich aus den hieraus resultierenden Zwangsbedingungen die Modellgleichungen ergeben. Eine Modellgleichung ist folglich eine Verknüpfung wenigstens eines Teils der Koordinaten der Gliedkoordinatensysteme für jene Glieder, die durch das entsprechende Gelenk verbunden werden.

[0031] Zur Darstellung dieses Zusammenhangs soll zunächst vor der Behandlung realer Gelenke auf elementare Zwangsbedingungen für aneinandergrenzende Gliedkoordinatensysteme eingegangen werden, wobei komplexe, ein Gelenk beschreibende Zwangsbedingungen dann aus diesen elementaren Zwangsbedingungen zusammensetzbar sind. Hierzu wird auf die **Fig. 1A** bis **1E** verwiesen. In jeder dieser Figuren sind mittig je zwei Gliedkoordinatensysteme im Ausgangszustand, d. h. in deckungsgleicher Lage gezeigt. Diese beiden Koordinatensysteme werden im Folgenden als Gliedkoordinatensystem j und Gliedkoordinatensystem k bezeichnet.

[0032] Im Fall der **Fig. 1A** besitzen diese beiden Gliedkoordinatensysteme einen gemeinsamen Punkt, wobei beide Gliedkoordinatensysteme um diesen Punkt rotieren können. Die drei resultierenden, rotativen Freiheitsgrade sind für beide Gliedkoordinatensysteme skizziert. Wird der Vektor vom Ursprung der Gliedkoordinatensysteme zum gemeinsamen Punkt mit p→ bezeichnet, so lässt sich die resultierende Zwangsbedingung beispielsweise wie folgt darstellen: t→$_j$ + R(&phgr;→$_j$)·p→ = t→$_k$ + R(&phgr;→$_k$)·p→(3)

[0033] Hierbei sind die Variablenbezeichnungen entsprechend zu Gleichung 1 gewählt, d. h. der Positionsvektor p→ zum gemeinsamen Punkt muss auch rücktransformiert in das Weltkoordinatensystem für beide Gliedkoordinatensysteme das gleiche Ergebnis liefern. Hierbei ist zu beachten, dass die Positionsvektoren p→ innerhalb ihrer Gliedkoordinatensysteme fest sind und immer den gleichen Punkt bezeichnen, d. h. die Darstellung von p→ in den beiden Koordinatensystemen wird sich nicht verändern, so dass in Gleichung 3 der Positionsvektor p→ nicht für das Gliedkoordinatensystem j und das Gliedkoordinatensystem k unterschieden wird. Vom Weltkoordinatensystem aus betrachtet, weisen die Positionsvektoren im Allgemeinen in unterschiedliche Richtungen, jedoch bei der Beachtung der Translation und Rotation der Gliedkoordinatensysteme gemäß Gleichung 3 immer auf einen gemeinsamen Punkt, der jedoch im Weltkoordinatensystem verschiebbar ist.

[0034] **Fig. 1B** stellt den Fall dar, dass das Gliedkoordinatensystem j und das Gliedkoordinatensystem k im Weltkoordinatensystem die gleiche Orientierung aufweisen sollen. Folglich können beide Gliedkoordinatensysteme relativ zueinander nur noch translatorische Bewegungen ausführen. Mathematisch lässt sich dies ausdrücken durch die Übereinstimmung der den Rotationsbewegungen der beiden Gliedkoordinatensysteme zugeordneten Euler-Winkel. Dies entspricht folgendem formelmäßigen Zusammenhang: &phgr;→$_j$ = &phgr;→$_k$(4)

[0035] Eine weitere elementare Zwangsbedingung ist in **Fig. 1C** dargestellt. Die beiden Gliedkoordinatensysteme weisen hierbei einen gemeinsamen Achsvektor a→ auf.

[0036] Dieser Achsvektor ist in **Fig. 1C** skizziert zusammen mit den möglichen Freiheitsgraden der beiden Gliedkoordinatensysteme relativ zueinander. Hierbei sind weiterhin translative Bewegungen möglich, wie auch ein rotativer Freiheitsgrad um die durch den Achsvektor a→ vorgegebene Richtung. Diese elementare Zwangsbedingung verknüpft wiederum einen Teil der Weltkoordinaten der beiden angrenzenden Gliedkoordinatensys

Seite 8 --- ()

teme durch folgenden mathematischen Zusammenhang: R(&phgr;→$_j$)·a→ = R(&phgr;→$_k$)·a→(5)

[0037] **Fig. 1D** zeigt den Fall von zwei senkrecht aufeinander stehenden Achsvektoren a→$_j$ und a→$_k$ jeweils für das Gliedkoordinatensystem j und das Gliedkoordinatensystem k. Beide Gliedkoordinatensysteme können sich zwar noch translativ bewegen, jedoch ist die Rotation auf jeweils einen einzigen Rotationsfreiheitsgrad beschränkt, der durch den jeweiligen Achsvektor festgelegt ist. Mathematisch lässt sich dies wie folgt ausdrücken, was auch gleichzeitig die Darstellung der die beiden Gliedkoordinatensysteme verknüpfenden elementaren Zwangsbedingung ist: R(&phgr;→$_j$)·a→$_j$·R(&phgr;→$_k$)·a→$_k$ = 0(6)

[0038] Eine weitere elementare Zwangsbedingung, bei der ein Punkt des einen Gliedkoordinatensystems auf einer Achse des anderen Gliedkoordinatensystems liegen muss, ist in **Fig. 1E** skizziert. Dargestellt ist, dass dem Gliedkoordinatensystem j als Bewegungsfreiheiten die Rotation um diese Achse sowie eine Verschiebung entlang der Achse verbleiben. Das Gliedkoordinatensystem k kann sich in Achsrichtung verschieben und in alle drei Winkelrichtungen um den Punkt rotieren. Formelmäßig lässt sich diese elementare Zwangsbedingung wie folgt darstellen: (t→$_j$ - t→$_k$ + R(&phgr;→$_j$)·p→ - R(&phgr;→$_k$)·p→) × (R(&phgr;→$_j$)·a→) = 0(7)

[0039] In Worten ausgedrückt bedeutet dies, dass der Vektor p→, der dem Punkt auf der Achse zugeordnet ist, für die beiden Gliedkoordinatensysteme jeweils ins Weltkoordinatensystem zurück transformiert wird. Die Differenz der sich so ergebenden Vektoren spannt wiederum einen Vektor auf, der linearabhängig zum ins Weltkoordinatensystem rücktransformierten Achsvektor a→ ohne die translative Komponente ist, so dass sich aus dem Kreuzprodukt dieser beiden Vektoren der Nullvektor ergibt.

[0040] Weitere elementare Zwangsbedingungen sind die Unterbindung einzelner Bewegungsfreiheiten für ein Gliedkoordinatensystem. Diese sind im Einzelnen nicht in den Figuren dargestellt, wobei sich jedoch für den dreidimensionalen Fall für jede der einzelnen sechs Freiheitsgrade der Wert der zugeordneten Koordinate auf einen bestimmten Wert, etwa zu Null, setzen lässt, so dass weitere sechs elementare Zwangsbedingungen resultieren.

[0041] Realen Gelenken können wiederum zur Charakterisierung des Gelenktyps einzelne oder eine Kombination von elementaren Zwangsbedingungen zugeordnet werden. Für einige beispielhafte Gelenke ist dies in den **Fig. 2A-2D** dargestellt. **Fig. 2A** zeigt ein Kugelgelenk. Diesem ist die elementare Zwangsbedingung eines gemeinsamen Punktes zugeordnet. Als Teil der Gelenkdaten muss als Gelenkpunkt der Positionsvektor p→ dieses gemeinsamen Punktes angegeben werden.

[0042] **Fig. 2B** zeigt ein Scharniergelenk, das die Bewegungsfreiheit der beiden angrenzenden Glieder auf lediglich eine Rotation in Richtung der Gelenkachse beschränkt. Ausgedrückt durch elementare Zwangsbedingungen entspricht dies einer Kombination der elementaren Zwangsbedingung eines gemeinsamen Punktes sowie der elementaren Zwangsbedingung eines gemeinsamen Achsvektors. Als Teil der Gelenkdaten sind somit als Gelenkpunkt der gemeinsame Punkt p→ sowie a→ als Achsvektor anzugeben.

[0043] **Fig. 2C** zeigt ein Kardangelenk. Hier sind die verbleibenden Freiheitsgrade der angrenzenden Glieder auf zwei Drehrichtungen beschränkt, wobei die beiden Drehrichtungen für die Glieder senkrecht aufeinander stehen. Entsprechend kann einem Kardangelenk somit die elementare Zwangsbedingung eines gemeinsamen Punktes sowie die elementare Zwangsbedingung zweier senkrecht aufeinander stehender Achsvektoren zugeordnet werden. Als Gelenkdaten wären für diesen Fall der gemeinsame Punkt p→ sowie die Rotationsvektoren a→$_j$ und a→$_k$ anzugeben.

[0044] **Fig. 2D** zeigt ein Schubgelenk ohne Orientierung. Beide Glieder können sich entlang der Schubrichtung bewegen sowie um diese Richtung frei rotieren. Demnach sind diesem Gelenktyp die elementaren Zwangsbedingungen eines gemeinsamen Achsvektors sowie die elementare Zwangsbedingung eines Punktes in einem der Gliedkoordinatensysteme auf einer Achse des zweiten Gliedkoordinatensystems zugeordnet. Als Teil der Gelenkdaten sind entsprechend der Achsvektor a→ sowie der Gelenkpunkt p→ anzugeben.

[0045] Werden nun alle Modellgleichungen zu einem Modellgleichungssystem kombiniert, so stellt jede Lö

Seite 9 --- ()

sung dieses Gleichungssystems eine mögliche Bewegungsstellung des parallelen Roboters dar. Im Allgemeinen wird dieses Gleichungssystem somit unterbestimmt sein. Die Gleichungen, die zur Festlegung einer bestimmten Sollposition im Weltkoordinatensystem bzw. einer bestimmten Sollposition in Antriebskoordinaten führen, ergeben sich wiederum durch eine zusätzliche Eingabe, die im Folgenden als Steuerungsvorgabe bezeichnet wird. Zunächst soll dies anhand des inversen kinematischen Problems erläutert werden: Mindestens einem Punkt auf einem Glied, der beispielsweise eine Arbeitsplattform trägt, wird hierbei eine bestimmte Position im Weltkoordinatensystem zugeordnet. Für eine Bewegungsfolge würde dies bedeuten, dass die Bewegung zu einem bestimmten Zeitpunkt eingefroren wird. Da die Lagekoordinaten des Gliedes in seinem Gliedkoordinatensystem bekannt und unveränderlich sind, wird durch diese Angabe einige oder alle Freiheitsgrade des zugeordneten Gliedkoordinatensystems festgelegt. Diese entsprechende Festlegung wird als Steuerungsgleichungen bezeichnet. Aus einer Kombination der Modellgleichungen und der Steuerungsgleichungen entsteht ein Gesamtgleichungssystem, welches möglicherweise überbestimmt ist, und dessen numerische Lösung die erzwungene Lage der restlichen Glieder des parallelen Roboters beschreibt. Die Antriebskoordinaten ergeben sich dann direkt aus der Relativstellung einzelner aneinandergrenzender Glieder.

[0046] Zur Erstellung der Steuerungsgleichungen werden bevorzugt zwei Verfahrensschritte durchgeführt. Im ersten Schritt, der als Steuerungsanforderung bezeichnet wird, ist die Art des zu lösenden Problems, d. h. entweder des direkten oder des inversen kinematischen Problems, zu bestimmen. Im vorliegenden Ausführungsbeispiel wird das inverse kinematische Problem betrachtet. Ebenfalls Teil der Steuerungsanforderung ist die Festlegung für welche strukturelle Komponente des parallelen Roboters bei der Steuerung eine Vorgabe angeben wird. Durch die Wahl des inversen kinematischen Problems bezieht sich diese Vorgabe auf die Lage und/oder die Orientierung eines oder mehrer Glieder im Weltkoordinatensystem und somit auf eine Gleichung, die wenigstens einen Teil der Koordinaten des dem jeweiligen Glied zugeordneten Gliedkoordinatensystems mit Werten belegt. Diese Werte müssen jedoch für den Verfahrensschritt der Steuerungsanforderung keine Konstanten sein, vielmehr können stattdessen hierfür ganz oder teilweise Variablen eingesetzt werden, so dass parametrisierte Steuerungsgleichungen resultieren. In einem zweiten, nachfolgenden Schritt der Steuerungsvorgabe, der Steuerungseingabe, werden dann diese Variablen bzw. Parameter durch Zahlenwerte ersetzt, wobei die Steuerungseingabe für die Vorgabe einer Lagefolge mehrfach ausgeführt werden kann.

[0047] Ist stattdessen das direkte kinematische Problem zu lösen, so resultieren aus dieser Änderung in der Steuerungsanforderung auch Veränderungen in den parametrisierten Steuerungsgleichungen. In diesem Fall sind dann die Antriebskoordinaten zu beschreiben, d. h. im allgemeinen Fall Gelenkpositionen der als aktiv ausgewählten Gelenke und somit Relativstellungen der jeweils angrenzenden Glieder zueinander. Ist eines der beiden angrenzenden Glieder im Weltkoordinatensystem fixiert, so ergibt sich dann der besonders einfache Fall, dass die Koordinaten des angrenzenden Gliedkoordinatensystems bestimmte Wertevorgaben erhalten. Für den allgemeinen Fall werden sich jedoch je nach Gelenktyp bestimmte Wertevorgaben in den diesem Gelenk zugeordneten elementaren Zwangsbedingungen ergeben. Dies soll für den Fall von zwei Gliedkoordinatensystemen beschrieben werden, die gemäß **Fig. 1E** einen gemeinsamen Punkt auf einer Achse haben. Soll nun der Verschiebung des Punkts auf der Achse ein bestimmter Wert zugeordnet werden, so lässt sich dies in der Umformulierung der elementaren Zwangsbedingung wie folgt ausdrücken: t→$_k$ + R(&phgr;→$_k$)·p→ = t→$_j$ + R(&phgr;→$_j$)·p→ + dist·(R(&phgr;→$_j$)·a→),(8) wobei der Variablen dist ein bestimmter Wert für die Verschiebung des Punktes p→ in Achsrichtung a→ zugeordnet ist. Für das vorliegende Beispiel stellt dies die parametrisierte Steuerungsgleichung dar, die sich aus der Steuerungsanforderung ergibt.

[0048] Werden dann für das direkte kinematische Problem in der Steuerungseingabe der Variablen dist bestimmte Wertevorgaben zugeordnet, so ergeben sich die Steuerungsgleichungen sowie durch die Lösung des Gesamtgleichungssystems aus Modell- und Steuerungsgleichungen wiederum die restlichen Koordinaten der den Gliedern zugeordneten Gliedkoordinatensysteme und somit die Position der Glieder selbst im Weltkoordinatensystem.

[0049] Durch eine mehrfach wiederholte Steuerungseingabe können Bahnbewegungen als Punktfolgen aufgenommen werden. Diese Punktfolgen können hinreichend fein gelegt bzw. interpoliert werden. Außerdem ist es möglich, die Punktfolgen mit einem Zeitindex zu versehen.

[0050] Die bisherigen Betrachtungen bezogen sich auf rein kinematische Fragestellungen, in einer Weitergestaltung der Erfindung ist es jedoch auch möglich, eine dynamische Betrachtung durchzuführen. Hierzu ist es zunächst notwendig, neben der Bestimmung der Bewegungsbahnen auch Geschwindigkeiten, Beschleuni

Seite 10 --- ()

gungen und eventuelle höhere Ableitungen zu ermitteln. Zu diesem Zweck kann das Gesamtgleichungssystem nach den Antriebsvariablen abgeleitet werden. Auch mehrfache Ableitungen sind möglich. Zur Modellierung von Kräften und Drehmomenten werden nun für jedes Glied bzw. Gelenk weitere Daten, wie die Masse oder Trägheitstensoren, gespeichert. Ferner berücksichtigt eine Weiterentwicklung des erfindungsgemäßen Gedankens auch Elastizitäten der Glieder bzw. der Gelenke, welche durch zusätzliche bzw. modifizierte Gleichungen in der Modelleingabe berücksichtigt werden können.

[0051] Das Gleichungssystem, das sich durch die Modelleingabe und durch die Steuerungsvorgabe ergibt, das so genannte Gesamtgleichungssystem, wird numerisch gelöst. Hierzu ist es vorteilhaft, dieses gesamte Gleichungssystem als Nullstellenproblem zu formulieren und mit dem bekannten iterativen Verfahren, beispielsweise dem gedämpften Newton-Verfahren in Verbindung mit dem Householder-Verfahren, zu lösen.

[0052] Anhand eines in **Fig. 3** gezeigten auf einen zweidimensionalen Fall beschränkten vereinfachten Beispiels eines parallelen Roboters soll der bevorzugte Verlauf des erfindungsgemäßen Verfahrens skizziert werden. Der dargestellte parallele Roboter weist vier Glieder auf, denen die Indizes 0-3 zugeordnet werden. Drei der Gelenke sollen als Rotationsgelenke ausgebildet sein, dies bedeutet im hier dargestellten ebenen Fall, dass die Relativbewegung der angrenzenden Glieder auf eine reine Rotation beschränkt ist. Das Gelenk zwischen dem Glied 0 und dem Glied 3 ist ein

Translationsgelenk. Dies soll als aktives Gelenk einen Antrieb darstellen, der sich parallel zur x-Achse translatorisch bewegen kann. Ferner soll das Glied 0 im Weltkoordinatensystem unbewegbar sein, d. h. eine feste Position besitzen.

[0053] Zunächst sind für die Modelleingabe die zu den Gliedern gehörenden Gliedkoordinatensysteme zu generieren sowie die Position eines jeden Gliedes im zugeordneten Gliedkoordinatensystem anzugeben. Hierbei wird die Eingabe dadurch vereinfacht, dass alle Gliedkoordinatensysteme in der Ausgangslage mit dem Weltkoordinatensystem übereinstimmen. In einer vorteilhaften Ausgestaltung eines Computerprogramms mit Programmcodemitteln zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens gibt der Benutzer lediglich die Gelenkdaten an. Die Anzahl der Glieder, die Erzeugung der zugeordneten Gliedkoordinatensysteme und die Festlegung der Lageposition der Glieder in diesen Gliedkoordinatensystemen wird dann automatisiert übernommen. Außerdem ergeben sich aus der Eingage der Gelenkdaten auch die Verknüpfungen der Gliedkoordinatensysteme angrenzender Glieder, so dass in einer bevorzugten Umsetzung des erfindungsgemäßen Verfahrens auch die Modellgleichungen automatisiert bestimmt werden.

[0054] Entsprechend einer vorteilhaften Ausgestaltung ist für diese Schritte der Modelleingabe von Seiten des Benutzers lediglich die Anzahl der einzelnen Glieder des parallelen Roboters zu bestimmen, wobei diese vorzugsweise von Null an durchindiziert werden. Mit der Angabe der Gelenkpositionen im Weltkoordinatensystem und der zusätzlichen Angabe der Indizes der angrenzenden Glieder, d. h. des Gelenkkontexts, können dann die Gliedlagen in den Gliedkoordinatensystemen automatisch bestimmt werden. Vorteilhafterweise werden in diesem Eingabeschritt auch die restlichen Gelenkdaten, wie der Gelenktyp und die Gelenkpunkte und/oder einer oder mehrere Achsvektoren festgelegt. Für das obige Beispiel stellt sich dies dann wie folgt dar: Gelenk zwischen Glied 0 und 1: • Gelenktyp: Rotationsgelenk • Gelenkkontext: 0; 1 • Gelenkpunkt: (40; 20) Gelenk zwischen Glied 1 und 2: • Gelenktyp: Rotationsgelenk • Gelenkkontext: 1; 2 • Gelenkpunkt: (70; 70) Gelenk zwischen Glied 2 und 3: • Gelenktyp: Rotationsgelenk • Gelenkkontext: 2; 3 • Gelenkpunkt: (115; 55) Gelenk zwischen Glied 3 und 0: • Gelenktyp: Translationsgelenk • Gelenkkontext: 3; 0 • Gelenkpunkt: (115; 20) • Achsenvektor: (1; 0)

Seite 11 --- ()

[0055] Ausgehend von den Gelenkdaten werden wiederum aus den elementaren Zwangsbedingungen die Modellgleichungen für die jeweils an das entsprechende Gelenk angrenzenden Gliedkoordinatensysteme festgelegt. Aufgrund der Zweidimensionalität des Ausführungsbeispiels reduziert sich die Rotationsmatrix auf die Form

[0056] Für das vorliegende Beispiel ergibt sich hieraus Folgendes: Rotationsgelenk zwischen Glied 0 und 1 erzeugt somit folgende Gleichung:

[0057] Rotationsgelenk zwischen Glied 1 und 2:

[0058] Rotationsgelenk zwischen Glied 2 und 3:

[0059] Translationsgelenk zwischen Glied 3 und 0: &phgr;$_3$ = &phgr;$_0$(14)

[0060] Für die Steuerungsvorgabe soll das direkte kinematische Problem betrachtet werden, was im Rahmen der Steuerungsanforderung festgelegt wird.

[0061] Im Ausführungsbeispiel kann dies beispielsweise so realisiert werden, dass vom Benutzer das Glied 0 als fest im Weltkoordinatensystem definiert und das Translationsgelenk zwischen Glied 3 und 0 als aktives Gelenk festgelegt wird. Hierbei können noch die bestehenden Freiheitsgrade für die Koordinaten der beiden Gliedkoordinatensysteme, die an das Translationsgelenk angrenzen, bestimmt werden, so dass folgende parametrisierte Steuerungsgleichungen nach der Durchführung der Steuerungsanforderung (14)-(17) resultieren: &phgr;$_0$ = 0(16)

[0062] Die Festsetzung des Glieds 0 könnte auch bereits mit den Modellgleichungen bestimmt werden, wenn es sich hierbei um einen durch die mechanische Struktur des parallelen Roboters bedingte Fixierung handelt.

[0063] Wird für die Bewegung entlang der x-Achse des Antriebs, d. h. des Translationsgelenks eine skalare Variable ANTRIEB eingeführt, so können die hieraus resultierenden parametrisierten Steuerungsgleichungen wie folgt dargestellt werden:

[0064] Wird nun die Variable ANTRIEB im Rahmen der Steuerungseingabe mit einem Wert versehen, so ergibt sich aus den damit vervollständigten Steuerungsgleichungen und den Modellgleichungen ein numerisch

Seite 12 --- ()

zu lösendes Gesamtgleichungssystem, das die Lage der Gliedkoordinatensysteme im Verhältnis zum Weltkoordinatensystem festlegt. Damit lassen sich auch die absolute Lage der Glieder im Weltkoordinatensystem oder ihre Relativlage und damit die Gelenkstellungen bestimmen.

Verfahren zur Steuerung eines parallelen oder hybriden Roboters mit Gliedern und Gelenken, umfassend: 1.1 eine Modelleingabe, aus der Modellgleichungen resultieren; 1.2 eine Steuerungsvorgabe, aus der Steuerurgsgleichungen resultieren; 1.3 eine numerische Lösung des Gesamtgleichungssystems bestehend aus den Modellgleichungen und den Steuerungsgleichungen; 1.4 wobei die Modelleingabe folgende Verfahrensschritte umfasst: 1.4.1 jedem Glied wird ein Gliedkoordinatensystem zugeordnet, das sich so mit dem entsprechenden Glied im weiteren Bewegungsverlauf mitbewegt, dass die Lagekoordinaten des Glieds im zugeordneten Gliedkoordinatensystem unverändert bleiben 1.4.2 die Lagekoordinaten für ein Glied im Weltkoordinatensystem wird durch die Lage des zugeordneten Gliedkoordinatensystems bezogen auf das Weltkoordinatensystem bestimmt; 1.4.3 für jedes Gelenk werden aus den Gelenkdaten Zwangsbedingungen für die Bewegungsmöglichkeiten der zugeordneten Gliedkoordinatensysteme der an das jeweilige Gelenk angrenzenden Glieder bestimmt; 1.4.4 die Gesamtheit aller Zwangsbedingungen stellen die Modellgleichungen dar; und 1.5 wobei die Steuerungsvorgabe einen Verfahrensschritt umfasst, bei dem wenigstens einer ersten Koordinate eines ersten Gliedkoordinatensystems in Form einer Steuerungsgleichung ein absoluter Wert oder ein Wert relativ zu einer zweiten Koordinate eines zweiten Gliedkoordinatensystems zugeordnet wird. Verfahren zur Steuerung eines parallelen oder hybriden Roboters nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Verfahrensschritt der Steuerungsvorgabe in eine Steuerungsanforderung und wenigstens eine Steuerungseingabe unterteilt wird, wobei bei der Steuerungsanforderung eine Auswahl zwischen dem direkten und dem inversen kinematischen Problem getroffen wird sowie die aktiven Strukturen des parallelen Roboters festgelegt werden, woraus parametrisierte Steuerungsgleichungen resultieren, deren Parameter im Verfahrensschritt der Steuerungseingabe mit Werten belegt werden. Verfahren zur Steuerung eines parallelen oder hybriden Roboters nach wenigstens einem der Ansprüche 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Lagekoordinaten eines Glieds in seinem zugeordneten Gliedkoordinatensystem aus den Positionsvektoren der an das Glied angrenzenden Gelenke bestimmt werden. Verfahren zur Steuerung eines parallelen oder hybriden Roboters nach wenigstens einem der Ansprüche 1-3, dadurch gekennzeichnet, dass alle Gliedkoordinatensysteme in der Ausgangsposition des parallelen Roboters mit dem Weltkoordinatensystem übereinstimmen. Verfahren zur Steuerung eines parallelen oder hybriden Roboters nach wenigstens einem der Ansprüche 1-4, dadurch gekennzeichnet, dass die Gelenke als Kombination elementarer Zwangsbedingungen ausgedrückt werden. Verfahren zur Steuerung eines parallelen oder hybriden Roboters nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass eine elementare Zwangsbedingung aus einer Gruppe von Bedingungen ausgewählt wird, welche die Verknüpfung zweier Gliedkoordinatensysteme durch einen gemeinsamen Punkt, durch eine übereinstimmende Orientierung im Weltkoordinatensystem, durch einen gemeinsamen Achsvektor, durch orthogonale Achsvektoren, durch einen Punkt eines ersten Gliedkoordinatensystems auf einer Achse eines zweiten Gliedkoordinatensystems und die Vorgabe von Werten für die eine Lage- oder Orientierungskoordinate eines Gliedkoordinatensystems im Weltkoordinatensystem umfasst. Verfahren zur Steuerung eines parallelen oder hybriden Roboters nach wenigstens einem der Ansprüche 1-6, dadurch gekennzeichnet, dass das Gesamtgleichungssystem als Nullstellenproblem umgeformt wird. Verfahren zur Steuerung eines parallelen oder hybriden Roboters nach wenigstens einem der Ansprüche 2-7 dadurch gekennzeichnet, dass ohne Wiederholung der Modelleingabe und/oder der Steuerungsanforderung die Steuerungseingabe mehrfach ausgeführt wird und nach jeder Steuerungseingabe das Gesamtgleichungssystem mit den aktuellen Steuerungsgleichungen numerisch gelöst wird.

Seite 13 --- ()

Verfahren zur Steuerung eines parallelen oder hybriden Roboters nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass aus der Abfolge der numerischen Lösungen des Gesamtgleichungssystems, die jeweils einer bestimmten Steuerungseingabe zugeordnet werden, Bewegungsdaten wenigstens eines Glieds und/oder Gelenks umfassend die Bewegungsbahn, die Geschwindigkeit, die Beschleunigung und den Ruck, bestimmt werden. Verfahren zur Steuerung eines parallelen oder hybriden Roboters nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass im Gesamtgleichungssystem zusätzliche und/oder modifizierte Gleichungen aufgenommen werden, die den Elastizitäten der Glieder und/oder der Gelenke zugeordnet werden. Verfahren zur Steuerung eines parallelen oder hybriden Roboters nach einem der Ansprüche 1-10 dadurch gekennzeichnet, dass durch die Wahl der Steuerungsvorgabe eine Sollposition eines oder mehrerer Glieder und/oder Gelenke im Weltkoordinatensystem festgelegt wird und aus der Lösung des Gesamtgleichungssystems Antriebskoordinaten in Form von Gelenkstellungen berechnet werden. Verfahren zur Steuerung eines parallelen oder hybriden Roboters nach einem der Ansprüche 1-11 dadurch gekennzeichnet, dass durch die Wahl der Steuerungsvorgabe für wenigstens eine Gelenkstellung Antriebskoordinaten vorgegeben werden und aus der Lösung des Gesamtgleichungssystems für ein oder mehrere Glieder und/oder Gelenke die resultierenden Lagepositionen und/oder Orientierungen im Weltkoordinatensystem festgelegt werden. Verfahren zur Steuerung eines parallelen oder hybriden Roboters nach einem der Ansprüche 1-12 dadurch gekennzeichnet, dass die Modelleingabe und/oder die Steuerungsvorgabe und/oder die Lösung des Gesamtgleichungssystems mittels einer dem parallelen Roboter zugeordneten Steuerungseinrichtung durchgeführt werden. Verfahren zur Steuerung eines parallelen oder hybriden Roboters nach wenigstens einem der Ansprüche 1-13, dadurch gekennzeichnet, dass aus der numerischen Lösung des Gesamtgleichungssystems Steuerungssignale zur Ansteuerung der aktiven Gelenke des parallelen Roboters berechnet werden. Verfahren zur Steuerung eines parallelen oder hybriden Roboters nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, dass die berechneten Steuerungssignale von einer Steuerungseinheit erzeugt und auf die aktiven Gelenke übertragen werden. Computerprogramm mit Programmcode-Mitteln, um die Verfahrensschritte gemäß wenigstens einem der Ansprüche 1-15 durchzuführen, wenn das Programm auf einem Computer ausgeführt wird. Computerprogramm mit Programmcode-Mitteln gemäß Anspruch 16, die auf einem computerlesbaren Datenträger gespeichert sind. Es folgen 3 Blatt Zeichnungen

Seite 14 --- ()

Seite 15 --- ()

Seite 16 --- ()