



(12)

Patentschrift

- (21) Anmeldenummer: A 401/2005 (51) Int. Cl.⁸: G01M 5/00 (2006.01)
(22) Anmeldetag: 2005-03-09
(43) Veröffentlicht am: 2006-07-15

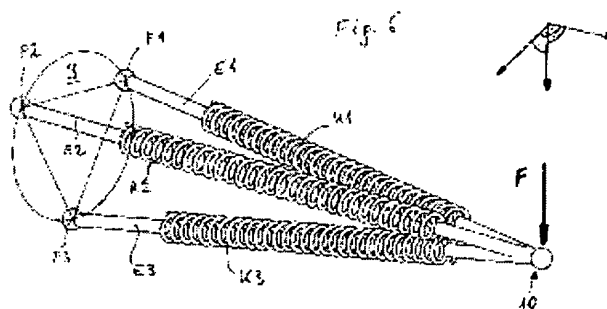
(73) Patentanmelder:
EHRENLEITNER FRANZ
A-4905 THOMASROITH (AT)

(54) VERFAHREN ZUR BESTIMMUNG DER ELASTISCHEN VERFORMUNG VON BAUTEILEN

- (57) Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bestimmung der elastischen Verformung von Bauteilen, insbesondere von parallelkinematischen Vorrichtungen, unter Last.

Das Verfahren ist dadurch gekennzeichnet, dass

- l) die Geometrie der Anlenkpunkte auf der festen Plattform (9) und der beweglichen Plattform (10) bestimmt werden, dass die Ersatzfederkonstanten der Aktuatoren (K1, K2, K3) und die Ersatzfederkonstanten der Lager bestimmt werden, dass
 - m) die theoretische Länge der Aktuatoren bestimmt wird, dass
 - n) daraus die theoretische Lage aller Anlenkpunkte im Raum bestimmt wird, dass
 - o) aus dieser Geometrie und der Last (F) die auf die einzelnen Aktuatoren wirkenden Kräfte bestimmt werden, dass
 - p) aus diesen Kräften und den Ersatzfederkennlinien das reale geometrische Bild und damit die reale Position der beweglichen Plattform bestimmt wird, und dass
- diese reale Position mit der berechneten theoretischen Position verglichen und gegebenenfalls



Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bestimmung und gegebenenfalls Kompensation der elastischen Verformung von festen oder beweglichen Bauteilen, insbesondere von parallelkinematischen Vorrichtungen, unter Last.

- 5 Parallelkinematische Vorrichtungen sind solche, die auf der Erkenntnis beruhen, dass ein starrer Körper im Raum sechs Freiheitsgrade aufweist und dass es daher möglich ist, die Lage eines solchen starren Körpers im Raum durch sechs voneinander unabhängige und in ihrer Länge veränderliche Abstandhalter, zumeist Stäbe, bei manchen Anwendungsfällen auch Seile oder dergleichen, allgemein Aktuatoren genannt, zu bestimmen, wenn diese Aktuatoren einer-
10 ends fest im Raum (feste Plattform) und andernends am zu bewegenden Körper (bewegliche Plattform) gelenkig angreifen.

- Diese parallelkinematischen Vorrichtungen weisen den großen Vorteil auf, dass sich die Toleranzen, die im Zuge der Bewegung der einzelnen Aktuatoren auftreten, nicht addieren, da es
15 keine Kinematik gibt, die wiederum auf einer anderen Kinematik sitzt, wie dies bei den klassischen Anordnungen der Fall ist, wodurch auch das Verhältnis Nutzlast zu Traglast dramatisch erhöht werden kann.

- Nachteilig und für viele Jahre den Einsatz solcher Vorrichtungen stark beschränkend ist die
20 Schwierigkeit der Berechnung der notwendigen Längenänderungen der Aktuatoren und des zeitlichen Verlaufes dieser Längenänderungen, die notwendig sind, um den starren Körper, zumeist bewegliche Plattform genannt, auf die gewünschte Weise zu bewegen.

- Aus diesen Gründen haben sich derartige parallelkinematische Vorrichtungen lange Zeit nur bei
25 Reifenprüfständen und bei Flugzeugsimulatoren durchsetzen können, während beispielsweise die Halterung der Werkzeuge bei Werkzeugmaschinen, der Aufbau von Kränen und dergl. und von fast allen anderen beweglichen Gebilden so war, dass ein Schlitten entlang einer Achse verfahren wird, dass auf diesem Schlitten ein weiterer Schlitten sitzt, der in eine Richtung normal zum ersten Schlitten verfahren wird und so fort, bis schließlich die Baggerschaufel oder das
30 Werkzeug der Drehmaschine etc. auf dem letzten dieser Schlitten befestigt ist. Aus diesem Beispielen sieht man auch, dass und bei welchen Anwendungsgebieten Seile statt Stäben einsetzbar sind.

- Aus Coordinate-free Formulation of a 3-2-1 Wire-based Tracking Device using Cayley-Menger
35 Determinants von F. Thomas, E. Ottaviano, L. Ros and M. Ceccarelli, veröffentlicht am 14. September 2003 anlässlich der International Conference on Robotics and Automation in Taipeh, Taiwan, geht eine parallelkinematische Vorrichtung hervor, bei der drei der Aktuatoren an einem gemeinsamen Punkt der beweglichen Plattform angreifen, und zwei weitere an einem weiteren gemeinsamen Punkt, woher die Bezeichnung 3-2-1-Kinematik herrührt. Durch diese
40 Anordnung der Aktuatoren wird eine wesentliche Vereinfachung der oben genannten komplexen Berechnungen möglich. Ein großer Nachteil dieser Anordnung ist aber, dass es in der Praxis nur auf extrem aufwendige Weise möglich ist, drei Stäbe (oder, wie in der Veröffentlichung, auch nur Seile) in einem Punkt angreifen zu lassen, weshalb diesem Sonderfall der parallelkinematischen Vorrichtungen bisher auch nur von Theoretikern Aufmerksamkeit gewid-
45 met wurde.

- In den noch nicht veröffentlichten österreichischen Patentanmeldungen A 1694/2004, A 1695/2004, A 1702/2004 und A 1919/2004 des Anmelders wird nun eine Möglichkeit be-
50 beschrieben, derartige mehrfache Gelenke durch sogenannte Pseudotripelpunkte bzw. Pseudodoppelpunkte zu ersetzen, die einerseits eine wesentliche Vereinfachung des Aufbaues dieser Gelenke erlauben und andererseits die geometrischen Vorteile der 3-2-1-Kinematik und insbesondere deren mathematische Zugänglichkeit erhalten.

- Dies erlaubt es, die Parallelkinematik auch bei Werkzeugmaschinen, bei Lasthebemaschinen
55 etc. zu verwenden. Um nun die Vorteile der Parallelkinematik voll zu nutzen und insbesondere

ihre Genauigkeit und ihre leichte Bauweise weiter zu treiben, ist es wünschenswert, die momentane elastische Deformation der parallelkinematischen Vorrichtung zu erfassen und durch entsprechende Betätigung der Aktuatoren auszugleichen, wodurch die Genauigkeit der Bewegung erhöht und/oder die Masse der Vorrichtung gesenkt werden kann. Damit hat sich wegen der

5 oben erläuterten Einschränkungen im Stand der Technik niemand wirklich beschäftigt, da die Rechenleistungen bestenfalls dazu ausreichen, die Längenänderungen der Stäbe zu berücksichtigen, nicht aber die Lagenänderungen der Lager, die von gleicher Größenordnung und oft sogar größer sind.

10 Es hat der Erfinder bei der intensiven Beschäftigung mit den praktischen Möglichkeiten der 3-2-1-Kinematik festgestellt, dass diese eine extrem schnelle und genaue Berechnung der Lagen und der Lagenänderungen der Angriffspunkte der Aktuatoren erlaubt, die eine in-time Berücksichtigung der elastischen Deformation durch die Last erlaubt, wenn eine entsprechende Ersatzkinematik verwendet wird. Dabei konnte der Erfinder feststellen, dass die Ersatzkinematik

15 es in diesem Zusammenhang und für diesen Zweck erlaubt, auch Gebilde abzubilden, die mit parallelkinematischen Vorrichtungen oder Stabwerken nichts zu tun haben und deren Deformation bisher, wenn überhaupt, nur mit den Mitteln der finiten Elemente berechenbar war.

Es ist somit spezielles Ziel und Aufgabe der Erfindung, ein Verfahren der eingangs genannten

20 Art anzugeben, bei dem insbesondere die Berechnung der momentanen Verformung so rasch erfolgen kann, dass ein Ausgleich mit so kurzer Verzögerung möglich ist, dass sowohl beim Einsatz als Werkzeugträger als auch beim Einsatz bei Lasthebemaschinen keine Fehler am Werkstück bzw. keine Beschädigung von Gütern oder Einrichtung oder Gefährdung von Personen beim Einsatz als Lasthebemaschine auftreten.

25 Ein allgemeines Ziel der Erfindung ist es, für beliebige Gebilde wie Rohre, Schweißkonstruktionen, Schalen, Kuppeln, Kranausleger, etc. (allgemein: Bauteile) eine Ersatzkinematik des Typs der 3-2-1-Kinematik anzugeben, die eine rasche Bestimmung der globalen elastischen Deformation unter Last erlaubt. Der Begriff global steht dabei für die Tatsache, dass aus der Ersatzkinematik nur die Deformation bzw. Lagenänderung der beweglichen Plattform gegenüber der

30 festen Plattform hervorgeht, nicht aber die Deformation der dazwischen liegenden Bereiche.

Erfindungsgemäß werden die speziellen Ziele bei einer 3-2-1-Kinematik dadurch erreicht, dass

- 35 a) die Geometrie der Anlenkpunkte auf der festen Plattform und der beweglichen Plattform bzw. gegebenenfalls einer Zwischenplattform bestimmt und gespeichert werden, und dass die Ersatzfederkonstanten der Lagerungen im Fundament, der beweglichen und gegebenenfalls der Zwischenplattform (Anlenkpunkte der Aktuatoren), die Ersatzfederkonstanten der Aktuatoren und die Ersatzfederkonstanten der Lager bestimmt und gespeichert werden,
- 40 dass
- b) die momentane theoretische Länge der Aktuatoren aufgrund der Einstellung ihrer Antriebe bestimmt wird, dass
- c) daraus die theoretische Lage aller Anlenkpunkte bzw. aller Aktuatoren im Raum für diese Werte bestimmt wird, dass
- 45 d) aus dieser Geometrie und der Last, die entweder bekannt ist oder durch Sensoren an den Aktuatoren und/oder der beweglichen Plattform bestimmt wird, die auf die einzelnen Aktuatoren, Gelenke und Lager wirkenden Kräfte bestimmt werden, dass
- e) aus diesen Kräften und den Ersatzfederkennlinien, die reale, momentane Lage der Lager und Länge und Lage der Aktuatoren bestimmt werden, woraus das reale momentane geometrische Bild und damit die momentane reale Position der beweglichen Plattform bestimmt
- 50 wird, und dass
- f) diese reale Position mit der zuvor berechneten theoretischen Position verglichen und gegebenenfalls durch Betätigung entsprechender Aktuatoren in Übereinstimmung gebracht wird.

55 Diese Berechnungen sind bei den parallelkinematischen Vorrichtungen des Standes der Tech-

5 nik trotz der bereits zur Verfügung stehenden Rechnerleistung nicht ausreichend schnell durchführbar gewesen, um in der Praxis verwendbar zu sein, erst durch die Verwendung der sogenannten 3-2-1-Kinematik und insbesondere durch deren Realisierung in Form sogenannter Pseudodoppelgelenke und Pseudotrippelgelenke ist eine Berücksichtigung der Deformation erstmals möglich geworden.

10 Die Lösung der allgemeinen Aufgabe umfasst neben den obigen Schritten noch die Schaffung der Ersatzkinematik, was dem Fachmann in Kenntnis der Erfindung keine Schwierigkeiten bereitet. Es kann dabei die für den betrachteten Anwendungsfall zu erwartende Belastung bei der Wahl des Ersatzstabwerkes insofern berücksichtigt werden, als Symmetrien zur weiteren Vereinfachung genutzt werden.

15 Um zu den notwendigen Ersatzfederkonstanten zu kommen, können am realen Bauteil durch entsprechende reale Belastung und Vermessung der realen Deformation die einzelnen Komponenten ermittelt werden, die dann am Ersatzstabwerk den einzelnen Stäben, Lagern, Angriffspunkten zugeordnet werden, um zu einem übereinstimmenden Bild im Bereich der beweglichen Plattform zu kommen. Statt der Messung realer Deformation ist auch die Durchrechnung der Deformation des Bauteiles, beispielsweise mittels finiter Elemente, möglich. Es ist dabei zu bedenken, dass diese Berechnung nur einmal durchgeführt werden muss, und das unabhängig von der späteren Benutzung des erhaltenen Ergebnisses während der Belastung des Bauteiles, sodass der hohe Rechenaufwand hier keine nachteiligen Effekte mit sich bringt. Weiters ist dabei zu bedenken, dass es sich um Berechnungen von Deformationen handelt, die (zumindest jede für sich) um Größenordnungen kleiner ist als die Größe des Bauteiles bzw. sein Arbeitsweg.

25 Der Begriff bewegliche Plattform steht in seiner allgemeinen Bedeutung ganz einfach für den geometrischen Bereich des Bauteiles, dessen Lageänderung berechnet werden soll, und ist bevorzugt auch am realen Bauteil ein massiver, u.U. als starr anzusehender Teil, wie: das Ende des Kranauslegers, die Schneide des Werkzeuges (TCP - Tool Center Point), der Aufhängungspunkt des Isolators eines Strommastes, die Spitze der Messsonde einer Messvorrichtung, die Halterung eines Drahtes für Funkenerosion, etc.. Im Vergleich dazu steht feste Plattform im allgemein für eine Basis, die im Rahmen der gestellten Aufgabe als fest anzusehen ist, unabhängig von der wirklichen Situation in Relation zum Erdboden und ist somit eine Frage der zweckmäßigen Definition.

35 Aus den Ergebnissen der Untersuchung des realen Bauteiles wird die erfindungsgemäße 3-2-1-Ersatzkinematik samt Ersatzfederkonstanten abgeleitet, je nach Anwendungsgebiet mit oder ohne Deformation der (oder einiger) Lager. Auf die 3-2-1-Ersatzkinematik werden sodann die realen Kräfte rechnerisch angewandt. Die errechneten Deformationen (Lageänderungen zwischen fester und beweglicher Plattform) geben auf direkte oder leicht rückrechenbare Weise die Lageänderung am realen Bauteil und ermöglichen so die notwendigen Korrekturen bzw. liefern die gewünschten Kenntnisse.

45 Die Erfindung wird im folgenden an Hand der Zeichnung näher erläutert. Dabei zeigt

50 die Fig. 1 eine reale Parallelkinematik mit einer aus einem Rohr bestehenden beweglicher Plattform,
die Fig. 2 die 3-2-1-Ersatzkinematik mit aufgelöster beweglicher Plattform,
die Fig. 3 die 3-2-1-Ersatzkinematik mit schematisch eingezeichneten Ersatzfedern und
die Fig. 4 bis 7 zeigen die Ausbildung einer Ersatzkinematik im Detail.

55 In Fig. 1 ist rein schematisch eine parallel-kinematische Vorrichtung 1 in perspektivischer Ansicht dargestellt. Sie besteht aus einer festen Plattform 2, die beispielsweise das Fundament sein kann oder auch ein Schlitten oder ein Fahrwerk, auf dem die eigentliche Parallelkinematik 3 bzw. die sie bildenden Stäbe und Aktuatoren verschenkbar gelagert ist. Die anderen Enden

der Stäbe und Aktuatoren, im folgenden kurz unter der Bezeichnung Aktuator zusammengefasst, tragen eine bewegliche Plattform 4. Diese bewegliche Plattform 4 weist im dargestellten Ausführungsbeispiel ein fest mit ihr verbundenes Rohr 5 auf, an dessen freiem Ende ein Werkzeughalter 6 schematisch angedeutet ist, dessen Spitze den Tool Center Point TCP 7 repräsentiert.

Da die verstellbaren Aktuatoren der Vorrichtung 1 zwar im Bereich der Reichweite den TCP 7 an jeden beliebigen Ort bringen können, aber dabei seine Orientierung nicht beeinflussen können, sind im Werkzeughalter 6 üblicherweise weitere, nicht dargestellte, Verstellmechanismen vorgesehen, die es zumindest in Grenzen erlauben, die Orientierung des TCP 7 mit der gewünschten Orientierung in Einklang zu bringen.

Die eigentliche Parallelkinematik 3 ist nach dem eingangs erläuterten 3-2-1 Prinzip aufgebaut, das heißt, dass drei Aktuatoren A1, A2 und A3 einen gemeinsamen Angriffspunkt, den Trippelpunkt TP an der beweglichen Plattform 4 aufweisen und zwei weitere Aktuatoren, die Aktuatoren A4 und A5, an dem in Fig. 1 vom Rohr 5 verdeckten Doppelpunkt DP angreifen, während der Aktuator A6 nur für sich allein am Einzelpunkt EP angreift.

Im dargestellten Ausführungsbeispiel sind die Aktuatoren A3, A5 und A6 als längenveränderliche Aktuatoren dargestellt, die Aktuatoren A1, A2 und A4 als Stäbe konstanter Länge. Dies dient nur der Illustrierung und muss keinesfalls so sein, es können andere, oder auch mehr als die drei, Aktuatoren längenveränderlich ausgestaltet sein, dies kann auch den Aufbau des Werkzeughalters 6 beeinflussen. Wie bereits erwähnt, werden üblicher Weise nur längenveränderliche Stäbe als Aktuatoren bezeichnet, doch wird dies in der Beschreibung und den Ansprüchen, weil es für die Erfindung selbst keine Rolle spielt, zur besseren Lesbarkeit nicht so gehandhabt, sondern es werden im allgemeinen alle Stäbe ohne Rücksicht darauf, ob es sich um solche fester Länge oder Aktuatoren im engeren Sinne handelt, als Aktuatoren bezeichnet.

Die bewegliche Plattform 4 ist in ihrer Lage im Raum gegenüber der festen Plattform 2 durch die Länge der Aktuatoren A1 bis A6 und die Lage der Fußpunkte dieser sechs Stäbe auf der festen Plattform 2 und der beweglichen Plattform 4 eindeutig festgelegt und damit auch die Lage des TCP 7, da er ja mittels des Rohres 5 als Bestandteil der beweglichen Plattform 4 anzusehen ist.

Wie aus der Form und Dimensionierung der beweglichen Plattform 4 leicht ersichtlich ist, wird diese durch Kräfte, die auf den TCP 7 wirken, deformiert, sodass die bewegliche Plattform 4, ebenso wie die Parallelkinematik 3, nicht als starr anzusehen ist, sondern als elastisch deformierbares Gebilde.

Bei einer ganzen Reihe von Anwendungsgebieten ist es nun notwendig, die momentane Lage des TCP 7 und, über die Zeit gesehen, dessen Bewegungsbahn mit hoher Genauigkeit zu kennen bzw. einzuhalten. Selbst wenn man die Aktuatoren und die bewegliche Plattform 4 äußert massiv und damit steif ausbildet, bestehen Probleme mit der Beweglichkeit in den Lagern und, bei den längenveränderlichen Aktuatoren, mit der Steifigkeit deren Antriebe.

Dazu kommt, dass ein Gebilde wie die bewegliche Plattform 4 mit dem daran befestigten Rohr 5 und der Werkzeughalterung und Werkzeug 6 bis zum TCP 7 in ihrer Deformation nur sehr schwer und auch mit modernen Rechnern nur langsam zu erfassen ist.

Diese Schwierigkeiten kann man erfindungsgemäß umgehen, indem man die feste Plattform 4 durch das aus Fig. 2 ersichtliche zweifache Modell einer 3-2-1 Parallelkinematik ersetzt, ein festes Stabwerk 14 für die eigentliche bewegliche Plattform 4 und ein verstellbares 3-2-1-Stabwerk 15 für das Rohr 5 samt Werkzeughalter 6 und Werkzeug bis zum TCP 7. Die längenveränderlichen Aktuatoren E1, E2 und E3 dienen im verstellbaren Stabwerk 15 als Ersatz für die im Werkzeughalter 6 enthaltenen Verstellmechanismen. Diese Stabwerke 3, 14, 15 gemäß

der Fig. 2 werden nun erfindungsgemäß durch die in Fig. 3 angedeuteten Ersatzfederkräfte ergänzt bzw. ersetzt, wobei im dargestellten Beispiel auch die in den Lagern an der festen Plattform 2 auftretenden Deformationen mittels der schematisch eingezeichneten Ersatzfederkräfte berücksichtigt sind.

Die Ersatzfederkräfte können beispielsweise für die Fußpunkte der Parallelkinematik 3 auf der festen Plattform 2 durch einfache Versuche bestimmt werden, die Ersatzfederkräfte für die in das Stabwerk 14 und 15 aufgelöste bewegliche Plattform 4 samt Rohr 5 können entweder durch eine Berechnung nach der Methode der finiten Elemente ermittelt werden, oder es wird ebenfalls durch einen Versuch, das heißt durch praktische empirische Messung, die Steifigkeit in den einzelnen Richtungen ermittelt und diese Komponenten werden dann den einzelnen Ersatzstäben zugeordnet.

Diese umfangreichen Messungen bzw. Berechnungen werden vor dem Zusammenbau und der Inbetriebnahme der Vorrichtung vorgenommen und unterliegen somit keiner zeitlichen Vorgabe, es ist auch möglich, die notwendigen Berechnungen auf einer anderen Rechenanlage durchzuführen als später zum Betrieb der Vorrichtung zur Verfügung steht.

Durch die im Modell bekannte Geometrie, entsprechend der Fig. 3, ist es bei bekannter Stellung der längenveränderlichen Aktuatoren stets möglich, sehr rasch die theoretische Position des TCP 7 zu bestimmen. Wenn nun die auf ihn wirkende Kraft bekannt ist, was im Falle eines Werkzeugträgers durch Dehnmessstreifen oder piezoelektrische Sensoren ohne weiteres möglich ist, so ist es in Kenntnis der Ersatzkinematik gemäß Fig. 3 und der auf diese wirkenden Kraft leicht und rasch möglich, die Verschiebungen der Lagerpunkte und die Längenänderungen der Aktuatoren zu bestimmen und so die reale Position und Orientierung des TCP 7 zu berechnen. Ein Vergleich dieses Ergebnisses mit dem oben genannten und zuvor ermittelten Ergebnis ohne Last erlaubt es durch entsprechende Verstellung der Länge der längsverstellbaren Aktuatoren die reale mit der theoretischen Position in Übereinstimmung zu bringen.

Die Fig. 4 bis 7 zeigen einen im wesentlichen kegeligen Körper 8, dessen Basisfläche 9 als raumfest angenommen wird und auf dessen Spitze 10 eine Kraft F wirkt. Unter der Wirkung dieser Kraft F und zufolge der Fixierung der Basisfläche 9 kommt es zu einer Deformation des kegeligen Körpers 8, deren Größe und Richtung von der Geometrie des Körpers und dem Material, aus dem er besteht, abhängt. Die aus dieser Deformation resultierende Verschiebung der Spitze 10 kann nun entweder gemessen oder, beispielsweise mittels der Methode der finiten Elemente, bestimmt werden.

Diese Bestimmung der Verschiebung der Spitze 10 in Abhängigkeit von unterschiedlichen Richtungen der Kraft, bei orthogonaler Anordnung der Testkräfte zueinander reichen drei Versuche bzw. Berechnungen, und gegebenenfalls, wenn nicht die Spitze als Punkt betrachtet, sondern ein kleiner als starr betrachteter Endbereich 12 herangezogen wird, die Einwirkung von Momenten auf die Orientierung dieses starren Endbereiches, ist bei passender Anordnung und Auswahl wiederum durch dreifache Messung bzw. Berechnung möglich, aber im vorliegenden Fall der Darlegung der Modellbildung nicht berücksichtigt.

Aus diesem Grund der Beschränkung auf die Lage der Spitze 10 und der Einwirkung von Kräften, wie beispielsweise der Kraft F , ist es möglich, das in Fig. 5 dargestellte Ersatzstabwerk 11, bestehend aus drei Ersatzstäben E_1 , E_2 , E_3 als Modell des kegeligen Körpers 8 heranzuziehen. Wesentlich ist dabei, dass die ideal gedachten Endpunkte der Ersatzstäbe E_1 , E_2 , E_3 auf der Seite der Basisfläche 9 fest, aber momentenfrei schwenkbar befestigt sind und in der Spitze 10 ebenfalls zu einem Punkt, aber untereinander gelenkig, zusammenlaufen.

Die Wahl des Aufbaus dieses Ersatzstabwerkes 11 erfolgt aufgrund von Überlegungen, die dem mit der Festigkeitslehre vertrauten Fachmann geläufig sind. Wenn beispielsweise der zu ersetzende Körper 8 eine Symmetrieebene oder Symmetrieachse aufweist, so ist es vorteilhaft,

wenn auch das Ersatzstabwerk diese Symmetrien besitzt. Wenn die zu erwartenden Kräfte in eine Richtung deutlich größer sind als in anderen Richtungen, so ist es günstig wenn diese Kräfte im wesentlichen von einem Ersatzstab aufgenommen werden bzw. wenn die Ersatzstäbe so angeordnet sind, dass sie symmetrisch zu der Fläche verlaufen, in der diese maximale oder häufigste Kraft eine Deformation verursacht. Es soll aber festgehalten werden, dass auch dann, wenn auf diese Überlegungen nicht geachtet wird und das Stabwerk aufgrund anderer Überlegungen erstellt wird, dieses Stabwerk brauchbar ist, wenn auch im allgemeinen der Rechenaufwand etwas größer sein wird, da verschiedene Vereinfachungen, die sich aufgrund der oben genannten Überlegungen weiter ergeben, dann nicht genutzt werden können.

Die Fig. 6 zeigt nun, wie, rein schematisch, die Ersatzstäbe E1, E2, E3 unter Berücksichtigung von Ersatzfederkonstanten K1, K2, K3 ein Ersatzgebilde schaffen, das mit dem ursprünglichen Körper 8 eines gemeinsam hat: Bei fixierter Grundfläche 9, das heißt bei fixierten Fußpunkten F1, F2, F3 der Ersatzstäbe E1, E2, E3 bewegt sich die Spitze 10 unter der Kraft F genauso wie die (deshalb mit dem gleichen Bezugszeichen versehene) Spitze 10 des realen Körpers 8. Dieses Ziel kann dann erreicht werden, wenn aus der bekannten Kraft F und der bekannten Verschiebung die Ersatzfederkonstanten K1, K2, K3 berechnet werden, die in Summe und unter Berücksichtigung der Geometrie des gewählten Ersatzstabwerkes 11 genau diese Verschiebung ergeben.

Da nun das Ersatzstabwerk 11 auch für die Berücksichtigung der Deformation in den anderen Richtungen, in Fig. 6 nur schematisch als orthogonales Koordinatensystem angedeutet, auf gleiche Weise zu zugeordneten Ersatzfederkonstanten führt, die ja immer nur in Richtung des jeweils betrachteten Stabes dessen Verlängerung bzw. Stauchung beschreiben, ist es im allgemeinen so, dass für jeden der Stäbe unterschiedliche Ersatzfederkonstanten für die unterschiedlichen Richtungen erhalten werden.

In verschiedenen Fällen, wenn beispielsweise die Deformation in eine Richtung bedeutsam ist und in den anderen Richtungen keine oder nur eine geringe Bedeutung hat, kann man sich damit behelfen, dass man die Ersatzfederkonstanten wählt, die für die Deformation in der wichtigen Richtung ein korrektes Bild liefern, man kann auch, wenn die unterschiedlichen Ersatzfederkonstanten nicht stark voneinander abweichen und wenn es notwendig ist die Deformation in mehreren Richtungen zu berücksichtigen, Mittelwerte wählen, man hat aber noch weitere Möglichkeiten zur Verfügung:

Die erste Möglichkeit besteht darin, die Geometrie zu ändern, hier insbesondere die Fußpunkte F1, F2 und F3 der Ersatzstäbe E1, E2, E3 auf der Basisfläche 9 anders anzuordnen und so dann die Zuordnung der Ersatzfederkonstanten K1, K2, K3 in den drei Richtungen erneut vorzunehmen. Aus dem Resultat: Verkleinerung der Unterschiede der drei Ersatzfederkonstanten für jeweils einen Stab oder Vergrößerung dieser Unterschiede, erkennt man sehr rasch, in welche Richtung und in welchem Ausmaß die Änderungen vorgenommen werden müssen, um zu einem befriedigenden Ergebnis zu gelangen. Solche iterativen Annäherungen an das technisch bestmögliche Ergebnis sind insbesondere auch auf dem Gebiete der Festigkeitslehre üblich, sowohl auf dem Gebiete des Maschinenbaus, als auch auf dem Gebiete des Hoch- und Tiefbaus, und stellen daher für den Fachmann in Kenntnis der Erfindung keine Schwierigkeit dar.

Eine andere Möglichkeit besteht darin, dass, wie in Fig. 7 dargestellt, jedem der Fußpunkte F1, F2, F3 eine Lagersteifigkeit zugeordnet wird, was bedeutet, dass die Fußpunkte F1, F2, F3 beim Modell nicht mehr ortsfest sind, sondern in Abhängigkeit von der resultierenden Kraft und dem resultierenden Drehmoment (wenn ein solches berücksichtigt wird) in der Basisfläche und normal zu ihr bewegt werden. Da die Aufhängung der Ersatzstäbe E1, E2, E3 in den Fußpunkten F1, F2, F3 sphärisch momentenlos erfolgt, ist die resultierende Verlagerung der Fußpunkte immer in der momentanen Richtung des dort angreifenden Stabes und führt, auch hier ist ein iterativer Prozess möglich, durch die Verlagerung des Fußpunktes zu einer Änderung des

Zustandes des Ersatzstabwerkes 11 und damit unter Umständen auch zu einer Änderung der Richtung des betrachteten Stabes. Zumeist sind diese Änderungen allerdings so gering, dass sich jede Iteration erübrigt.

- 5 Der erfindungsgemäße Verfahren zur Abbildung eines realen Körpers 8 in Form eines Ersatzstabwerkes 11 wurde anhand eines sehr einfachen Anwendungsfall beschrieben, das Anwendungsbeispiel, das anhand der Fig. 1 bis 3 erläutert wurde nimmt, wie weiter oben kurz erläutert, auch Rücksicht auf die Lage einer als beweglichen Plattform anzusehenden spitzen Bereiches 12, dieser kann zwar ohne Schwierigkeit am realen Körper 8 definiert werden, doch
10 wäre es verfehlt, den nur zur Erläuterung eingezeichneten Bereich 13 am Ersatzstabwerk 11 als ein Abbild oder als Ersatzspitzenbereich 13 aufzufassen, da das Modell, das in Fig. 5 dargestellt ist, nur in der Lage ist, die Position der Spitze 10 (idealisiert) nicht aber die Orientierung einer eventuell diese Spitze 10 aufweisenden beweglichen Plattform oder eben eines Spitzenbereiches 12 abzubilden. Wenn dies geschehen soll, so ist ein Ersatzstabwerk, wie beispielsweise
15 das Ersatzstabwerk 15 der Fig. 2, heranzuziehen.

Wie aus dem geschilderten Sachverhalt und dem dargelegten Verfahren leicht zu entnehmen ist, spielt die Abmessung der kinematischen Vorrichtung 1 keine Rolle, das erfindungsgemäße Verfahren kann gleichermaßen für einen Hafenkran oder eine im Mikrometerbereich tätige
20 Werkzeugmaschine verwendet werden. Es kann die Erfindung nicht nur dazu verwendet werden, die Bewegung bzw. Orientierung des TCP 7 besonders genau zu lenken, sondern es ist selbstverständlich möglich, das erfindungsgemäße Verfahren dazu zu benutzen, die Masse der parallelkinematischen Vorrichtung weiter zu reduzieren und die Bewegungsgeschwindigkeit des TCP 7 zu erhöhen und die wegen der dadurch weichen Konstruktion und höheren Massenträgheitskräfte größeren Abweichungen des TCP 7 von seiner Bahn zu korrigieren. Selbstverständlich können auch Zwischenformen dieser beiden Strategien gewählt werden, dies ist für den Fachmann auf dem Gebiete des jeweiligen Anwendungsgebietes in Kenntnis der Erfindung leicht möglich.

30

Patentansprüche:

1. Verfahren zur Bestimmung und gegebenenfalls Kompensation der elastischen Verformung zwischen einer festen und einer beweglichen Plattform einer parallelkinematischen Vorrichtungen unter Last, *dadurch gekennzeichnet*, dass
35 g) die Geometrie der Anlenkpunkte auf der festen Plattform und der beweglichen Plattform bzw. gegebenenfalls einer Zwischenplattform bestimmt und gespeichert werden, und dass die Ersatzfederkonstanten der Lagerungen im Fundament, der beweglichen und gegebenenfalls der Zwischenplattform (Anlenkpunkte der Aktuatoren), die Ersatzfederkonstanten der Aktuatoren und die Ersatzfederkonstanten der Lager bestimmt und gespeichert werden, dass
40 h) die momentane theoretische Länge der Aktuatoren aufgrund der Einstellung ihrer Antriebe bestimmt wird, dass
i) daraus die theoretische Lage aller Anlenkpunkte bzw. aller Aktuatoren im Raum für diese Werte bestimmt wird, dass
45 j) aus dieser Geometrie und der Last, die entweder bekannt ist oder durch Sensoren an den Aktuatoren und/oder der beweglichen Plattform bestimmt wird, die auf die einzelnen Aktuatoren, Gelenke und Lager wirkenden Kräfte bestimmt werden, dass
k) aus diesen Kräften und den Ersatzfederkennlinien, die reale, momentane Lage der Lager und Länge und Lage der Aktuatoren bestimmt werden, woraus das reale momentane geometrische Bild und damit die momentane reale Position der beweglichen Plattform bestimmt wird, und dass
50 diese reale Position mit der zuvor berechneten theoretischen Position verglichen und gegebenenfalls durch Betätigung entsprechender Aktuatoren in Übereinstimmung gebracht wird.
55

2. Verfahren zur Bestimmung der elastischen Verformung zwischen einer festen Fläche und einem Abstand von der festen Fläche aufweisenden Punkt bzw. einer Abstand von der festen Fläche aufweisenden Fläche eines Bauteiles unter Last, *dadurch gekennzeichnet*, dass:

als Ersatzstabwerk eine 3-2-1-Ersatzkinematik so geschaffen wird, dass deren feste Plattform geometrisch die feste Fläche abbildet und deren bewegliche Plattform den betrachteten Punkt bzw. die betrachtete Fläche, dass

anschließend am realen Bauteil durch reale Belastung, Kraft und gegebenenfalls Moment, und Vermessung der daraus resultierenden realen Deformation in den einzelnen Richtungen die einzelnen Deformationskomponenten ermittelt werden, die anschließend am Ersatzstabwerk den einzelnen Stäben, Lagern, Angriffspunkten mit Ersatzfederkonstanten so zugeordnet werden, dass dessen bewegliche Plattform die gleiche Bewegung ausführt wie der Punkt bzw. die Fläche des realen Bauteils, wobei gegebenenfalls statt dieser Bestimmung die Durchrechnung der Deformation des Bauteiles, beispielsweise mittels des Verfahrens der finiten Elemente erfolgt, und dass

das Ersatzstabwerk dem Verfahren nach Anspruch 1 unterworfen wird.

Hiezu 7 Blatt Zeichnungen

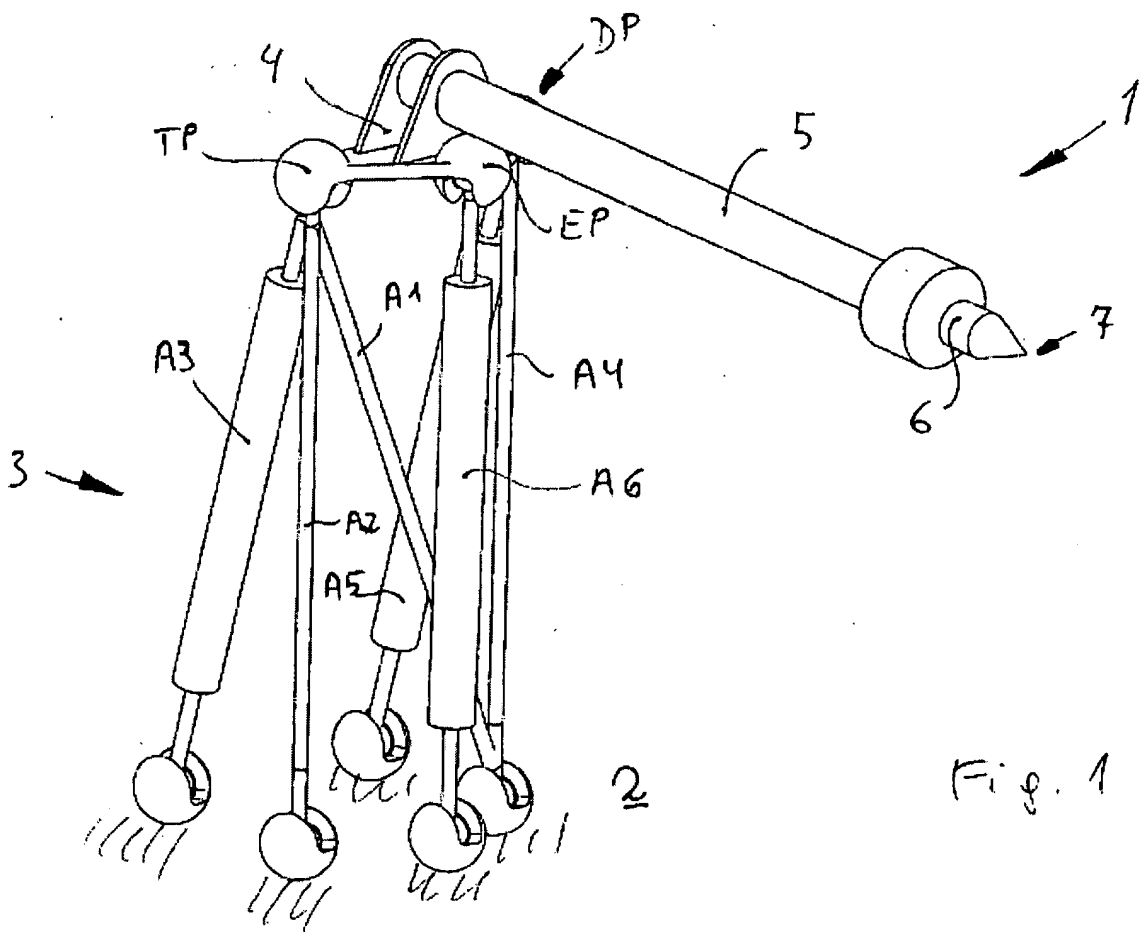


Fig. 1

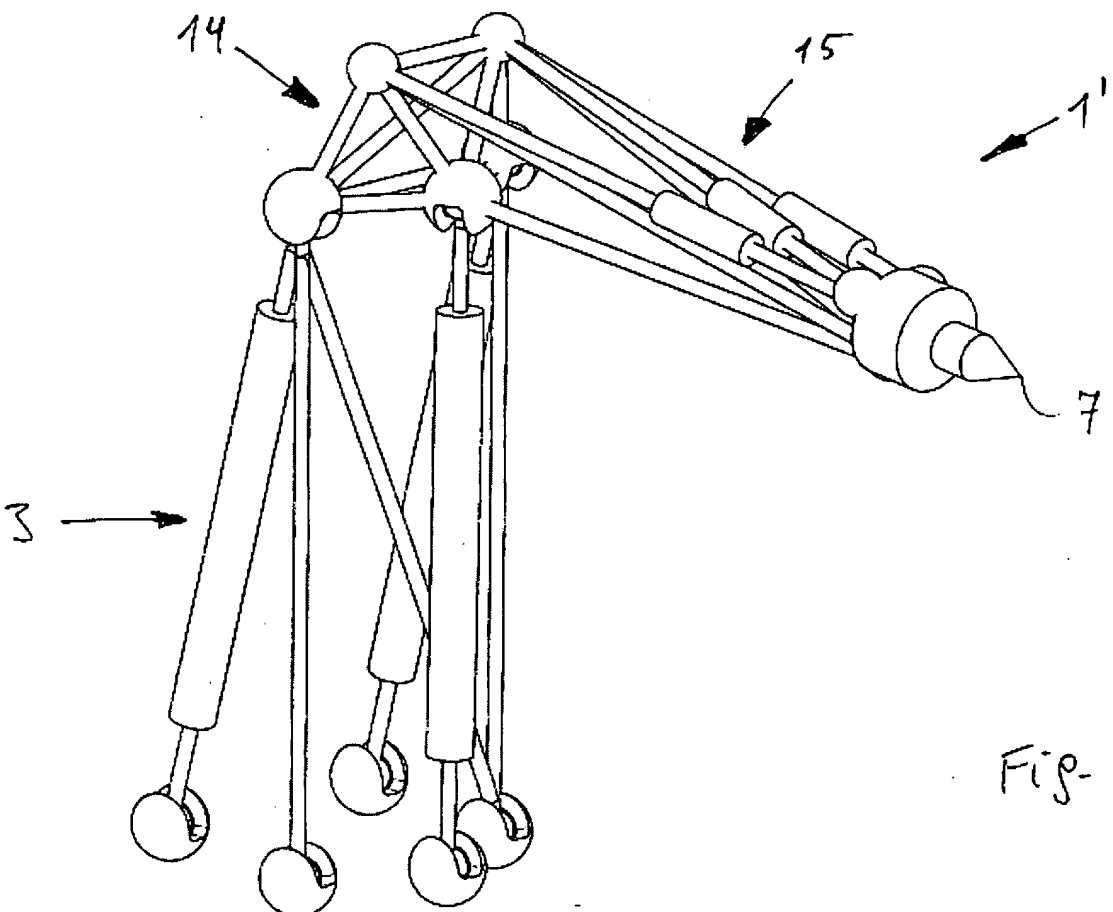
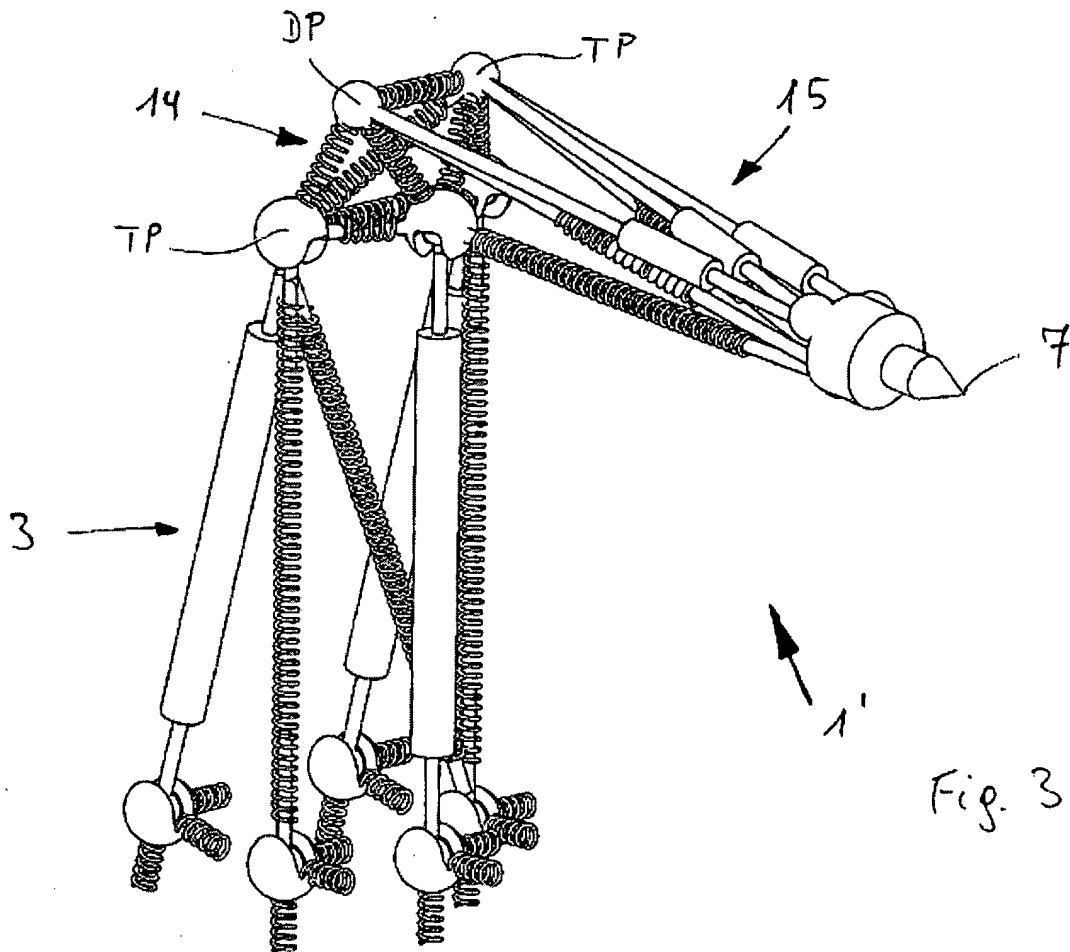


Fig. 2



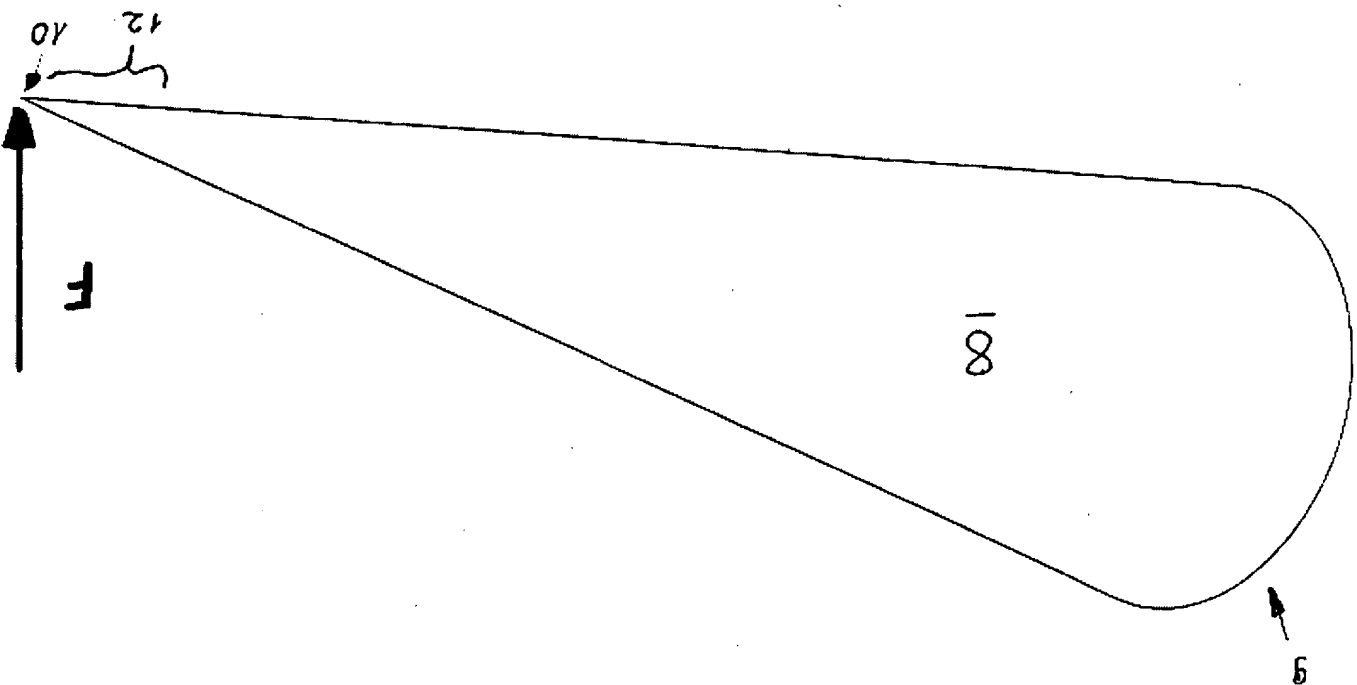


Fig. 4

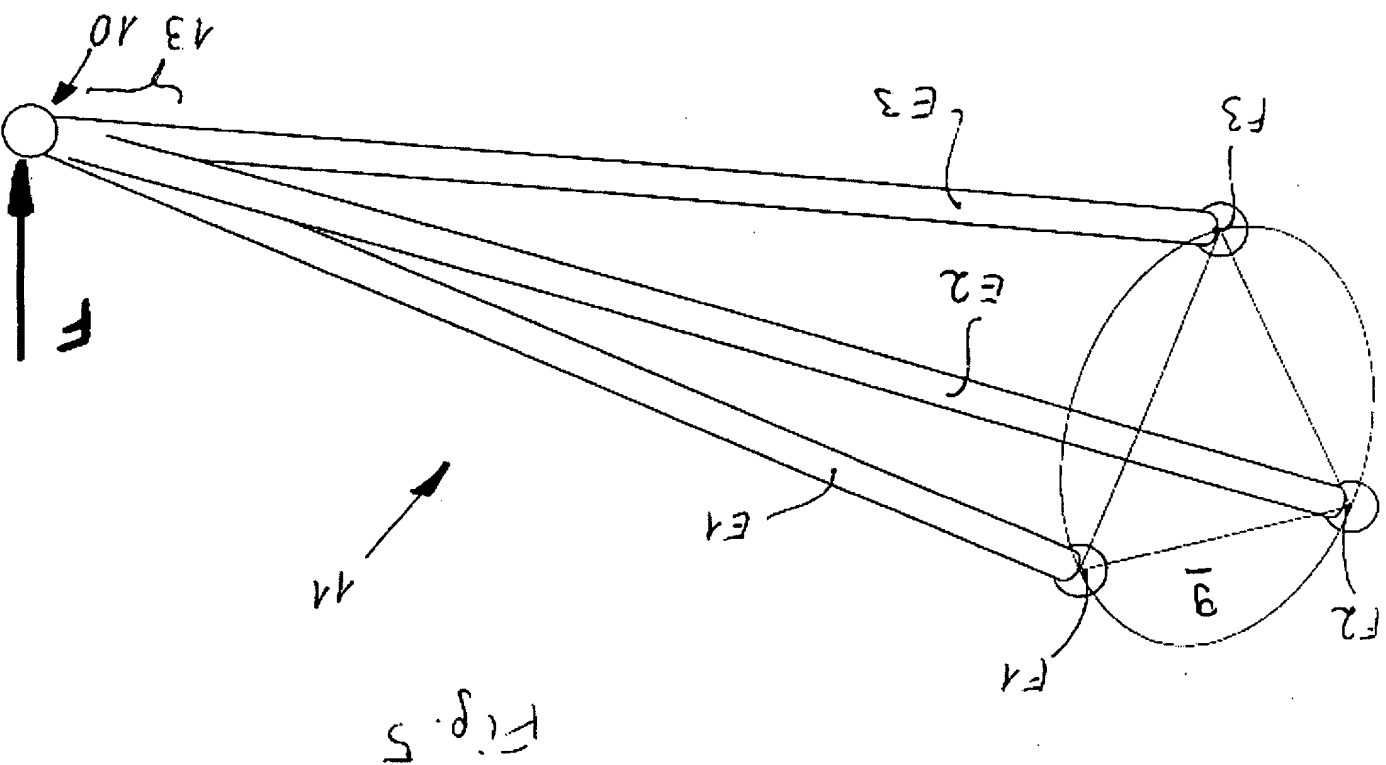
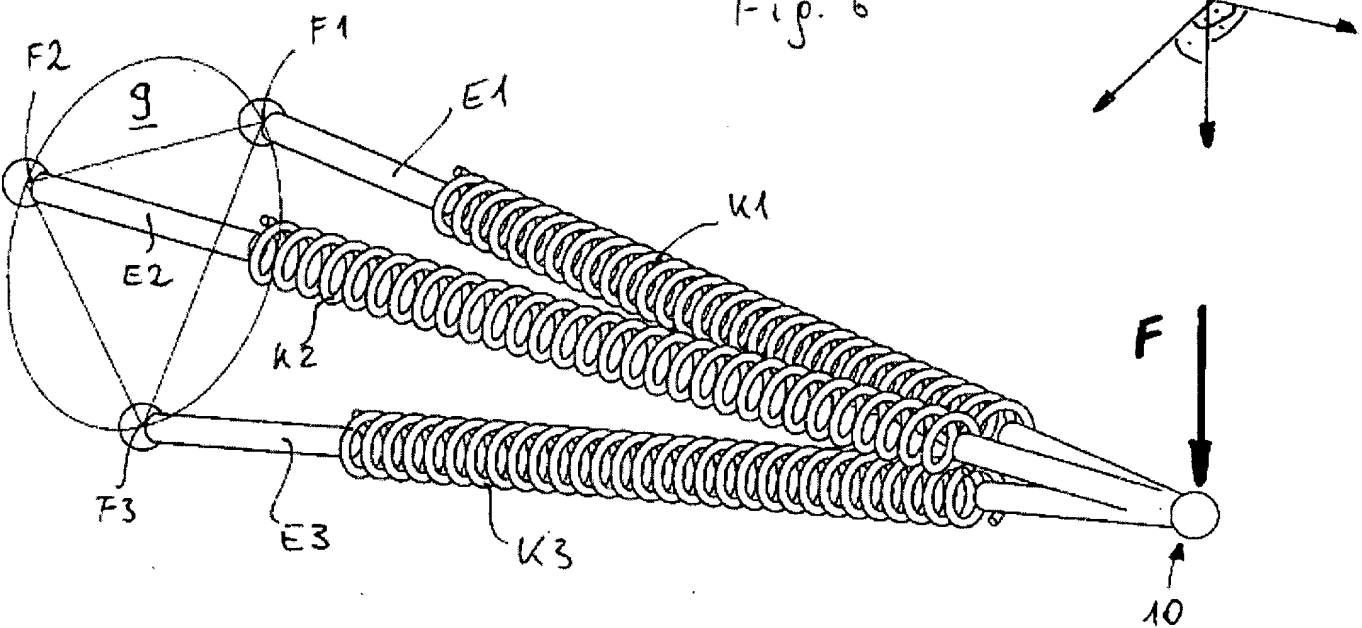




Fig. 6





österreichisches
patentamt

AT 501 167 B1 2006-07-15

Blatt: 7

Int. Cl. 8: G01M 5/00 (2006.01)

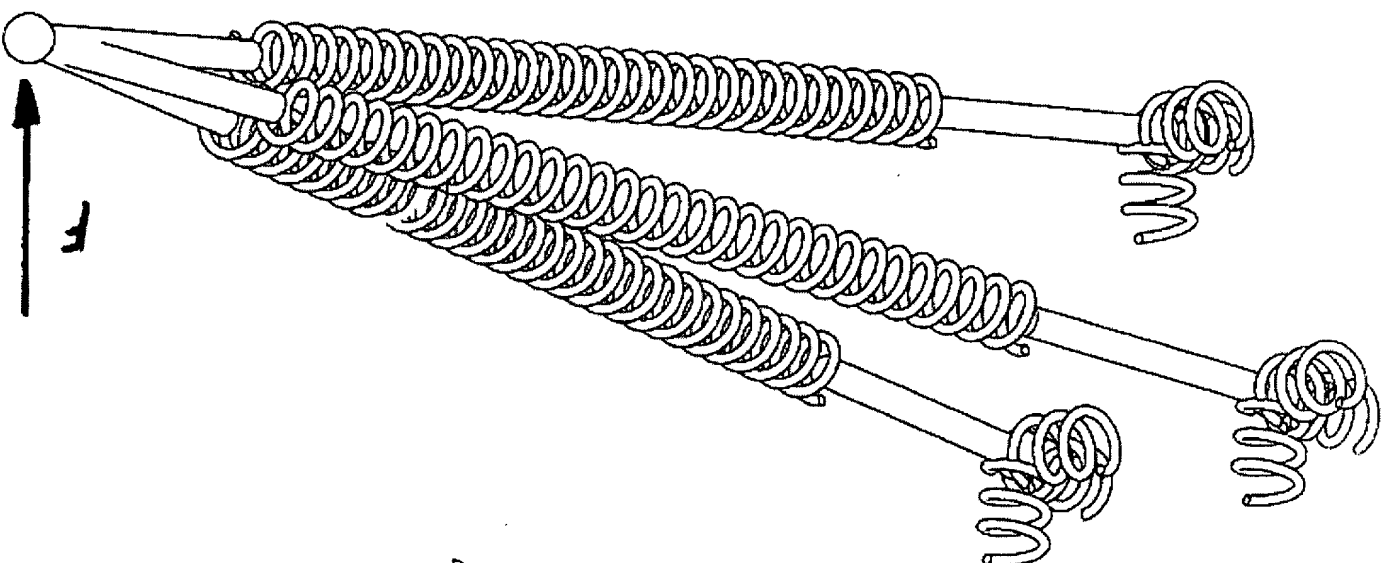


Fig. 7