

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

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum  
Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum  
04. Januar 2018 (04.01.2018)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
**WO 2018/001555 A2**

(51) Internationale Patentklassifikation:  
B25J 9/00 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2017/000744

(22) Internationales Anmeldedatum:  
27. Juni 2017 (27.06.2017)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:  
10 2016 007 741.7  
27. Juni 2016 (27.06.2016) DE

(72) Erfinder; und

(71) Anmelder: REESE, Marcel [DE/DE]; Eckardtsheimer Str.  
32, 33689 Bielefeld (DE).

(74) Anwalt: AHRENS, Thomas; Unterdorf 10, 38104 Braun-  
schweig (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für  
jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL,  
AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY,  
BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DJ, DK, DM, DO,  
DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN,  
HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP,  
KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME,  
MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ,  
OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA,  
SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN,  
TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für  
jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW,  
GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST,

(54) Title: EXOSKELETON AND MASTER

(54) Bezeichnung: EXOSKELETT UND STATTHALTER

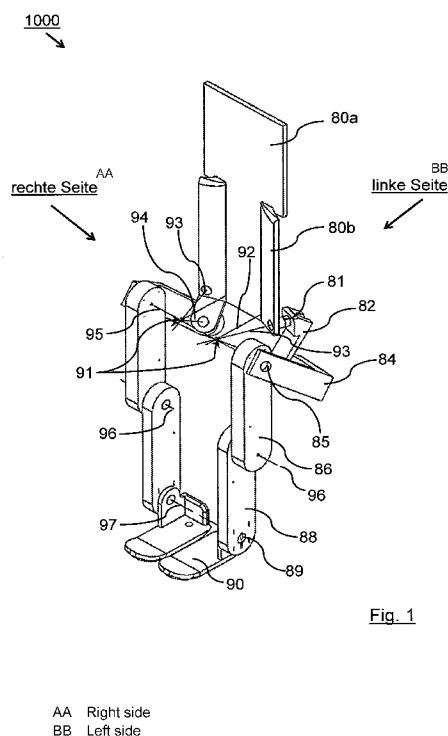


Fig. 1

(57) Abstract: The invention relates to the improvement of exoskeletons and masters thereof and to their use in teleoperative applications in virtual worlds or the real world. Non-actuated exoskeletons can be used to transfer loads from the user, for example, heavy luggage, tools or also the body weight of the user, to the ground and to relieve the joint and muscle system of the user. This can increase the endurance and also effective strength of the user. Motor-driven, actuated exoskeletons can be used in different fields. They can be worn as a freely moveable robotic suit which comprises a built-in energy supply and electronic control. They can also be used to improve the force and endurance of a user whilst the user moves in an unlimited environment. Another use of the fixed exoskeleton is in the field of interaction with virtual worlds or for controlling real robots. In this instance, an exoskeleton can be used to establish a teleoperative connection between the user and the master (virtual avatar or real robot). The user uses the exoskeleton to directly transfer control commands to the master. The elements of the user and the master then practically carry out the same movements synchronously. The aim of the invention is to improve exoskeletons and masters of the mentioned type and the associated control units. This can, in particular, be achieved by a favorable realization of rotational axes which define rotational movements of different elements which to a large extent perform a hip movement.

(57) Zusammenfassung: Die vorliegende Erfindung betrifft die Verbesserung von Exoskeletten und von Statthaltern sowie ihre Verwendung in teleoperativen Anwendungen in virtuellen Welten oder der realen Welt. Nicht aktuierte Exoskelette können dazu dienen, Belastungen auf den Nutzer, z.B. durch schweres Gepäck, Werkzeuge oder auch das Körpergewicht des Nutzers, auf den Boden zu übertragen und so das Gelenk und Muskelsystem des Nutzers zu entlasten. Dadurch kann die Ausdauer des Nutzers und auch seine effektive Stärke erhöht werden. Motorbetriebene, aktuierte Exoskelette finden Anwendung in verschiedenen Bereichen. Sie können als frei beweglicher, robotischer Anzug getragen werden, welcher über eine eigebaute

SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

**Erklärungen gemäß Regel 4.17:**

- *hinsichtlich der Berechtigung des Anmelders, ein Patent zu beantragen und zu erhalten (Regel 4.17 Ziffer ii)*
- *Erfindererklärung (Regel 4.17 Ziffer iv)*

**Veröffentlicht:**

- *ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts (Regel 48 Absatz 2 Buchstabe g)*

---

Energieversorgung und elektronische Steuerung verfügt. Sie können dann dazu dienen die Kraft und Ausdauer eines Nutzers zu verbessern während er sich ungebunden in einer Umgebung bewegt. Eine andere Anwendung stationärer Exoskelette liegt im Bereich der Interaktion mit virtuellen Welten oder in der Steuerung von realen Robotern. Hier kann ein Exoskelett dazu verwendet werden eine teleoperative Verbindung zwischen Nutzer und Statthalter (virtueller Avatar oder realer Roboter) herzustellen. Dabei verwendet der Nutzer das Exoskelett um direkte Steuerbefehle an den Statthalter zu übermitteln. Die Glieder des Nutzers und des Statthalters führen dann synchron praktisch dieselben Bewegungsabläufe durch. Der vorliegenden Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, Exoskelette und Statthalter der genannten Art sowie zugehörige Steuereinheiten zu verbessern. Das kann insbesondere erreicht werden durch eine günstige Realisierung von Drehachsen, die Rotationsbewegungen verschiedener Elemente definieren, welche größtenteils eine Hüftbewegung durchführen.

### **Exoskelett und Statthalter**

Die vorliegende Erfindung betrifft die Verbesserung von Exoskeletten und von Statthaltern sowie ihre Verwendung in teleoperativen Anwendungen in virtuellen  
5 Welten oder der realen Welt.

Exoskelette bilden einen robotischen Anzug welcher anthropomorph oder nicht-anthropomorph ausgelegt sein kann. Ein anthropomorpher Mechanismus ähnelt in seiner Auslegung der Geometrie und Kinematik eines Trägers sehr. Idealerweise  
10 bildet er eine Art "zweiter Haut", so dass jeder Punkt des Mechanismus eine konstante relative Transformation zu einem fixen Referenzpunkt des Nutzerkörpers hat. Das Exoskelett von Insekten kommt diesem Ideal sehr nahe. Anthropomorphe Exoskelette lassen sich an vielen Punkten oder an großen Bereichen fest mit dem menschlichen Körper verbinden, ohne dass sie die Bewegungsfreiheit des Nutzers  
15 erheblich einschränken würden oder dass Kräfte und Spannungen zwischen Exoskelett und Nutzer auftreten würden. Dies erlaubt z.B. die Befestigung einer Körperpanzerung oder von haptischen und taktilen Ein- und Ausgabeeinheiten sowohl an dem Körper des Nutzers, dem Exoskelett, oder beidem gleichzeitig. Nicht anthropomorphe Exoskelette werden in der Regel nur an wenigen Punkten  
20 des Nutzerkörpers befestigt, z.B. an der Hüfte und den Füßen oder dem Rücken und den Händen. Der Mechanismus ist hier so ausgelegt, dass er den Bewegungen der Hände oder Füße folgt und in seinem Arbeitsraum zu keinem Zeitpunkt mit seinem Bein oder Armmechanismus den Körper des Nutzers an anderen als den Befestigungspunkten berührt. Dabei kann der nicht anthropomorphe Mechanismus  
25 jedoch insgesamt sehr andere Bewegungen durchführen als der Nutzer und kann insgesamt mehr oder weniger Freiheitsgrade haben, als die Summe der Freiheitsgrade der bewegten und mit dem Mechanismus verbundenen Körperteile des Nutzers.

30 Nicht aktuierte Exoskelette können dazu dienen Belastungen auf den Nutzer, z.B. durch schweres Gepäck, Werkzeuge oder auch das Körpergewicht des Nutzers, auf den Boden zu übertragen und so das Gelenk und Muskelsystem des Nutzers zu

- 2 -

entlasten. Dadurch kann die Ausdauer des Nutzers und auch seine effektive Stärke erhöht werden.

Motorbetriebene, aktuierte Exoskelette finden Anwendung in verschiedenen  
5 Bereichen. Sie können als frei beweglicher, robotischer Anzug getragen werden, welcher über eine eingebaute Energieversorgung und elektronische Steuerung verfügt. Sie können dann dazu dienen, die Kraft und Ausdauer eines Nutzers zu verbessern während er sich ungebunden in einer Umgebung bewegt. Anwendungen liegen in der Unterstützung von schweren körperlichen Arbeiten wie dem Schiffsbau,  
10 Erhöhung der körperlichen Leistung und des Schutzes (Panzerung) von Soldaten, der Rehabilitation von Kranken oder dem Einsatz als Gehilfe bei gehbehinderten Menschen.

Kraft- und Drehmomentsensoren an den Gelenken des Exoskeletts, an  
15 Kontaktpunkten zwischen Nutzer und Exoskelett oder Sensoren zur Erfassung von myoelektrischen Signalen auf der Haut oder implantiert in den Nutzer können genutzt werden, um den Bewegungsablauf des Exoskeletts zu steuern. Insbesondere in der Anwendung als „gehender Rollstuhl“ kann die Eingabe der Steuersignale auch über einen Joystick, Gesichts- und Blickerkennung oder durch ähnliche manuelle,  
20 akustische oder visuelle Eingabemittel erfolgen. Ortsgebundene Exoskelette werden unter anderem zur Rehabilitation eingesetzt. Sie erlauben es, dass der Nutzer durch einen genau vorgegebenen Bewegungsablauf geführt wird und ggf. auch Kräfte aufbringen muss. Dadurch können sowohl Muskeln als auch Nerven stimuliert werden und die Bewegungsfähigkeit des Nutzers nachhaltig verbessert werden.

25 Eine andere Anwendung stationärer Exoskelette liegt im Bereich der Interaktion mit virtuellen Welten oder in der Steuerung von realen Robotern. Hier kann ein Exoskelett dazu verwendet werden eine teleoperative Verbindung zwischen Nutzer und Statthalter (virtueller Avatar oder realer Roboter) herzustellen. Dabei verwendet  
30 der Nutzer das Exoskelett um direkte Steuerbefehle an den Statthalter zu übermitteln. Die Glieder des Nutzers und des Statthalters führen dann synchron praktisch dieselben Bewegungsabläufe durch. Dabei kann auch ein Kraftfeedback erfolgen, so dass der Nutzer auch die Kräfte erfahren kann, welche auf Seiten des

- 3 -

Statthalters wirken und Kräfte des Nutzers auf sein Exoskelett ebenso am Statthalter ausgeübt werden. Anthropomorphe Exoskelette haben hier gegenüber nicht anthropomorphen den Vorteil, dass wirklich jeder Körperteil des Nutzers zur Interaktion zur haptischen Interaktion verwendet werden kann (also nicht etwa nur  
5 eine Hand, sondern auch Unterarm und Oberarm) und gleichzeitig Einheiten zur Vermittlung von taktilen und Wärmereizen sowohl am Nutzer als auch am Exoskelett befestigt werden können.

Insbesondere wenn die Beine des Nutzers genutzt werden sollen um direkt die  
10 Beine eines Statthalters zu steuern, ggf. mit Kraftrückkopplung (auch Kraft-Feedback oder Force-Feedback genannt), und der Nutzer so auch das Gleichgewicht des Statthalters direkt regulieren kann oder muss, ist der Nutzer im Exoskelett mit einer Bewegungsplattform verbunden (DE 10 2010 023 914 A1, „Verfahren und Vorrichtung zur Steuerung eines Statthalters“). Der Nutzer steht  
15 dann nicht mehr selber auf einem festen Boden, sondern die Füße des Exoskeletts stellen dem Nutzer beim Gehen und Laufen die Beschaffenheit des virtuellen oder entfernten realen Bodens dar, während der Nutzer im Exoskelett durch die Bewegungsplattform über den tatsächlichen Boden angehoben wird. Konstante und zeitabhängige lineare und rotatorische Beschleunigungen werden dem Nutzer im  
20 Exoskelett dann durch die Bewegungsplattform dargestellt. Da er üblicherweise eine stereoskope Brille oder andere geeignete Mittel benutzt um einen realistischen visuellen Eindruck der virtuellen oder realen Umgebung des Statthalters zu erfahren, und diese Eindrücke durch die entsprechenden haptischen und ggf. taktilen Eindrücke ergänzt werden, hat er den Eindruck an Stelle des Statthalters in  
25 einer virtuellen oder entfernten realen Umgebung zu agieren. Sollte der Nutzer den Statthalter so steuern, dass er nicht geht oder läuft, sondern stattdessen klettert, robbt, kriecht, oder auf den Händen gehen, etc. sollte, wird der Boden natürlich nicht nur durch die Füße, sondern auch durch andere Körperteile oder Bereiche des Exoskeletts dargestellt. Dies könnten insbesondere - aber nicht ausschließlich - die  
30 Unterschenkel, Knie, Oberschenkel, Hände, Unterarme, Oberarme, Kopf oder der Rücken sein.

- 4 -

In einer solchen Anwendung ist die Belastbarkeit des Exoskeletts von herausragender Bedeutung. Es muss das Gewicht des Nutzers tragen ohne sich nennenswert zu verformen oder seine Gelenk- und Aktuatorzustände erheblich zu verändern. Darüber hinaus muss es auch zusätzlich große dynamische Kräfte, wie sie beim Laufen oder Springen auftreten können, präzise, mit kleinsten Reaktionszeiten und Verzögerungen, sowie geringsten Schwingungen und Aktuatorabweichungen darstellen. Es ist außerdem wünschenswert, dass die Aktuatoren des Exoskeletts nachgeben können, wenn die Kräfte die der Nutzer auf sie ausübt so stark sind, dass der Mechanismus oder die Steuerung nicht schnell oder stark genug sind, ihnen einen geeigneten Widerstand zu bieten. Diese Rückfahrbarkeit (engl.: „back-drivability“) garantiert, dass weder der Nutzer, noch das Exoskelett Schaden nehmen und auch die Kontrolle über das System nicht verloren gehen muss, wenn übergroße oder schnell auftretender Kräfte wirken. Damit mechanische Systeme wie Getriebe, Übersetzungen, Untersetzungen, etc., rückfahrbar sein können, müssen sie über einen hohen mechanischen Wirkungsgrad, also geringe innere Reibung und geringe innere Energieverluste, verfügen.

Ein hoher Wirkungsgrad ist natürlich generell nützlich, da dadurch die Anforderungen an Aktuatoren, Motoren, Getriebe und Energieversorgung gesenkt werden können um eine geforderte Anforderung, wie Leistung, Kraft, oder Geschwindigkeit, zu erreichen. Er erleichtert auch die Modellierung und daher die Kontrolle von robotischen Systemen und insbesondere von Systemen mit Force-Feedback, da innere Verluste und wirkende Kräfte leichter zu quantifizieren sind. Besonders bei mobilen Exoskeletten, welche vom Nutzer getragen werden und über eine eigene Energieversorgung und Regelungseinheiten verfügen, wirkt sich der Wirkungsgrad auch auf die Einsatzdauer, das Gewicht und das Volumen des Exoskeletts und der nötigen Energieversorgung und Energiespeicher aus.

Generell ist es von Vorteil, wenn die Aktuatoren von Exoskeletten möglichst wenig Platz einnehmen und verfügbaren Platz optimal nutzen. Bei beweglichen Exoskeletten besteht ein Interesse daran, möglichst viel Nutzlast tragen zu können. Größere Aktuatoren reduzieren das dafür zur Verfügung stehende Volumen. Von

großem Interesse für Anwendungen bei Teleoperationen sind insbesondere Exoskelette, welche maximale Beweglichkeit (im Sinne der möglichen Körperhaltungen) für den Nutzer bereitstellen und alle oder die meisten Freiheitsgrade des Körpers, insbesondere die der Hüfte, aktuierten. Auch mobile

5 Exoskelette mit denen große Lasten getragen werden müssen, haben ähnliche Anforderungen, da auch hier Freiheitsgrade aktuiert werden müssen, die bei geringen Anforderungen noch alleine durch die Körperkräfte des Nutzers betrieben werden können. Solche Exoskelette mit vielen aktuierten Freiheitsgraden erfordern mehr Platz, da mehr und größere Aktuatoren benötigt werden. Auch in der

10 physischen Rehabilitation, als Gehilfe oder „gehender Rollstuhl“ verwendete Exoskelette, welche nicht unbedingt große Kräfte tragen müssen, aktuierten idealer Weise alle Freiheitsgrade, da so eine größere und natürlichere Beweglichkeit erreicht wird. Für all diese Anwendungen gilt, dass eine Vielzahl von ggf. großen Aktuatoren, Motoren und Getrieben dann den Bewegungsfreiraum des Nutzers

15 einschränken können, da sie bei extremen Bewegungen, wie einem Ausfallschritt, einem Spreizschritt, dem Überkreuzen der Beine, dem Sitzen, oder einer Innen- oder Außendrehung des Fußes, bzw. des Hüftgelenkes, mit anderen Elementen des Exoskeletts, der Nutzlast, Betriebsaggregaten, der Umgebung oder dem Nutzer selbst in räumlichen Konflikt geraten können.

20

Ein hoher Wirkungsgrad der Aktuatoren ist hier hilfreich, die Anforderungen an das Exoskelett zu erreichen und Platz zu sparen. Dies ist insbesondere dann schwierig, wenn Getriebe benutzt werden müssen um die nötigen hohen Kräfte zu erzeugen. Mehrstufige Untersetzungen sind in der Regel nicht rückfahrbar, Untersetzungen mit

25 wenigen Stufen sind großen oder zu großen Kräften ausgesetzt oder müssen sehr groß und schwer sein. Bürstenlose Elektromotoren können extrem effizient sein und über hohe Leistung bei kleinem Volumen und Außenmaßen verfügen. Sie können jedoch im Verhältnis nur relativ kleine Drehmomente erzeugen. Bürstenlose Torquemotoren sind ebenfalls sehr effizient, benötigen jedoch aufgrund ihrer großen

30 Durchmesser relativ viel Platz. Sie haben auch erhöhte Anforderungen an die Spannungsversorgung um große Drehmomente ohne Untersetzung erzeugen zu können.

Bekannt sind serielle, elastische Aktuatoren (serial, elastic actuators; „Series Elastic Actuators for legged robots“ J. Pratt, Krupp, 2004; “Stiffness Isn’t Everything”, G. Pratt et al, 1995; US 5,650,704, „ELASTIC ACTUATOR FOR PRECISE FORCE CONTROL“, G. Pratt, M. Williamson). Sie finden in humanoiden Robotern und  
5 Exoskletten Anwendung, um Gelenke direkt zu aktuierten oder Seile (ggf. in Bowdenzügen) anzutreiben, welche dann über Umlenkrollen Achsen aktuierten.

Aktuatoren dieser Art werden als Linearaktuatoren eingesetzt um über Hebel Scharniergelenke, wie die des Fußgelenks oder des Knies, anzutreiben (M2  
10 Roboter, MIT). Auch sind Anwendungen bekannt, in denen der Linearaktor mit dem zu aktuierten Gelenk ein Dreieck bildet und durch Änderung seiner Länge den Winkel des Gelenks aktuiert (RoboKnee, Yobotics). Im Allgemeinen ergibt sich das Problem, dass bei solchen Mechanismen das Übersetzungsverhältnis mit dem Winkel variiert. Daher müssen in der Konstruktion häufig Kompromisse  
15 eingegangen werden, wie z.B. zu große und zu kleine Übersetzungen in manchen Stellbereichen in Kauf genommen werden, um in anderen Stellbereichen die nötigen Werte erzielen zu können. Somit werden auch zu große und unnötig schnelle Aktuatoren und Motoren verwendet. Ebenso ist es schwierig große Winkelbereiche der Aktuation abdecken zu können, da bei größeren Bereichen Totpunkte auftreten,  
20 wo kein Drehmoment erzeugt werden kann und die Drehrichtung bei Längenänderung unbestimmt ist. Ebenso ist es nicht trivial den Aktuator an Gliedern des Roboters oder Exoskeletts zu befestigen, da dies unmittelbar die Gesamteigenschaften des Systems beeinflusst.

25 Besonders in den beiden Robotern M2 und M2V2 wurde auch ein Mechanismus eingesetzt, bei dem ein serieller, elastischer Aktuator (auch SEA genannt) ein geschlossenes Seil, oder einen äquivalenten Aufbau, antreibt, welches über zwei Rollen geführt ist. Eine dient als Umlenkrolle während die andere eine Achse antreibt und so ein Gelenk aktuiert (M2:

30 <http://www.ai.mit.edu/projects/labtours/LeggedRobots/LeggedRobots.ppt>, Seite 17; M2 <http://www.jontse.com/portfolio/m2.html>, Fig. 1; M2V2 <http://robots.ihmc.us/humanoid-robots/>



- 7 -

- ) . Dieser Aufbau hat im Vergleich zu seiner Gesamtlänge nur einen kleinen linearen Stellbereich. Dies limitiert bei einem gegebenen Rollendurchmesser der angetriebenen Achse den abgedeckten maximalen Winkelbereich (Differenz von maximalem zu minimalem Stellwinkel der Rolle, der Achse, bzw. des Gelenks).
- 5 Ebenso wird das maximale Drehmoment an der angetriebenen Achse, für einen gegebenen maximalen Winkelbereich und somit gegebenen Rollendurchmesser, begrenzt. Größere Rollen erzeugen für eine gegebene Kraft des SEA ein größeres Drehmoment, benötigen jedoch dann für den gleichen maximalen Winkelbereich größere linear Stellwege des SEA. In Robotern und Exoskeletten ist der verfügbare
- 10 Platz begrenzt. Daher ist es vorteilhaft einen möglichst großen Anteil der verfügbaren Länge, z.B. die Länge des Oberschenkels, als linearen Verfahrbereich nutzen zu können.

- Andere Aufbauten begegnen diesem Problem, indem sie die linearen Aktuatoren
- 15 nicht am Gelenk, sondern z.B. am Rücken des Roboters oder Exoskeletts (Walkagain Project, <https://www.youtube.com/watch?v=TcAvtglo9Jg>) anbringen und Bowdenzüge verwenden um Gelenke anzutreiben. Auch werden mehrere Aktuatoren parallel geschaltet um größere Kräfte ausüben zu können, oder Aktuatoren werden als Antagonisten zueinander betrieben, so dass einer Zug und
- 20 der andere Druck ausübt, dabei jedoch das Gelenk gemeinsam mit größerer Kraft aktuiert wird. Auch bekannt sind Systeme, wo mehrere Motoren über Zahnräder oder Zahnriemen eine Kugelumlaufspindel eines Aktuators gemeinsam antreiben.

- Bei einem perfekt anthropomorphen Exoskelett unterliegen die einzelnen Bauteile
- 25 den gleichen Transformationen wie die entsprechenden menschlichen Körperteile. So lässt sich z.B. das Kniegelenk in guter Näherung als Scharniergelenk beschreiben. Bei festem Oberschenkel und Flexion oder Extension der Unterschenkel erfährt der Unterschenkel dann eine pure Rotation um eine transversale Achse welche den Schenkkopf des Femur rechtwinklig zur
- 30 Sagitatebene durchschneidet. Die biologische Achse selbst bewegt (Translation und Rotation) sich beim Beugen des Unterschenkels nur wenig. Das heißt, dass sich für die Verbindung von Oberschenkel und Unterschenkel durch ein Exoskelett ein einfacher Mechanismus eignet, bei dem die Achse seines Scharniergelenks mit der

Achse des Kniegelenks, z.B. in ihrer Lage beim voll gestreckten Bein, übereinstimmt. In diesem Fall kann der obere Teil dieses Abschnitts des Exoskeletts fest am Oberschenkel befestigt werden, und der andere Teil fest am Unterschenkel. Da auch das Kniegelenk kein perfektes Scharniergelenk ist, werden jedoch noch

5 Spannungen zwischen Exoskelett und Körperteilen auftreten, wenn das Gelenk stark über seine Ausgangslage hinaus bewegt wird. Dieser Effekt kann durch geeignete Polster leicht kompensiert werden, so dass dem Nutzer keine großen Hemmnisse oder Unannehmlichkeiten bereitet werden, wenn er sein Knie bewegt. Das Knie hat auch einen begrenzten Bereich in dem es um die vertikale Achse

10 rotieren kann. Diese Bewegung ist bei einem solchen Mechanismus unterdrückt, was jedoch die Funktion des Knies nur begrenzt einschränkt. Es ist daher für fast alle Anwendungen ausreichend, das Kniegelenk des Menschen nur als Mechanismus mit einem Freiheitsgrad aufzufassen und ein Exoskelett hier entsprechend zu gestalten. Es kann jedoch, wie beim „SERKA knee actuator“, auch

15 ein polyzentrisches Gelenk aktuiert werden. Besonders wenn das Kniegelenk des Exoskeletts aktuiert werden soll, ist es in der Regel ausreichend nur den Hauptfreiheitsgrad (Flexion und Extension) zu berücksichtigen, da er den größten Teil des Bewegungsraums abdeckt und den weitaus größten Teil der Arbeit bei der Bewegung leistet.

20

Wird die gleiche Annahme beim Sprunggelenk getroffen, so dass nur Flexion und Extension des Exoskeletts möglich sind, wiegt diese Einschränkung schwerer. Während das Sprunggelenk Flexion und Extension praktisch als reine Rotation um eine Achse ausführen kann, besitzt es auch den ausgeprägten Freiheitsgrad der

25 Pronation und Supination (sowie geringe Translationen und Rotationen der Achsen). Dieser zweite Freiheitsgrad ist wichtig um das Gleichgewicht beim Stehen und allen Gangarten zu steuern, sowie damit die Sohle des Fußes, und ggf. die eines getragenen Schuhs, unabhängig von der Neigung des Geländes und der Körperhaltung des Nutzers, stets flach auf einem geneigten Untergrund aufliegen

30 kann. Sind Pronation und Supination unterdrückt, wie z.B. beim Tragen von steifen Schuhen für den Ski-Abfahrtsport (welche Flexion und Extension wenigstens teilweise erlauben), ist die Möglichkeit des Gehens erheblich eingeschränkt. Daher besitzen auch Exoskelette in der Regel mehr als einen Freiheitsgrad für das

Fußgelenk, oder es wird auch ganz auf ein Exoskelett für dieses Gelenk verzichtet und nur das obere Bein unterstützt. In diesem Fall endet das Exoskelett am Unterschenkel und der Fuß des Nutzers und die Muskeln des Unterschenkels müssen alle Kräfte und Bewegungen ohne Unterstützung erbringen (z.B. AirLegs, <https://www.youtube.com/watch?v=U2e4tGokqe0>). Bei aktuierten Exoskletten für das Fußgelenk wird in der Regel nur der Freiheitsgrad der Flexion und Extension des Fußes aktuiert (z.B. BLEEX, „On the Mechanical Design of the Berkeley Lower Extremity Exoskeleton (BLEEX)“, Adam Zoss, H. Kazerooni, Andrew Chu). Besonders bei frei beweglichen Exoskletten zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit des Nutzers ist dies ausreichend, da hier bei der Fortbewegung die größten Kräfte und Leistungen auftreten. Daher kann der Nutzer auch schon durch ein einziges aktuiertes Gelenk des Fußes sehr unterstützt werden, während er den anderen Freiheitsgrad durch seine eigene Muskeltätigkeit steuert. Die Aktuation des zweiten Freiheitsgrades ist schwierig, da die Aktuatoren Platz einnehmen und die Beweglichkeit des Nutzers im Exoskelett daher erschweren können.

Das Hüftgelenk des Menschen ist in guter Näherung ein Kugelkopfgelenk. Es besitzt also drei voneinander unabhängige Freiheitsgrade der Rotation um den Mittelpunkt des Kopfes des Femur und keine erheblichen translatorischen Freiheitsgrade. Alle diese Freiheitsgrade sind wichtig um eine natürliche Fortbewegung zu ermöglichen, Arbeit zu leisten, das Gleichgewicht zu halten und die Orientierung der Füße zum Untergrund zu steuern. Bei frei beweglichen Exoskletten zur Unterstützung der Leistungsfähigkeit des Nutzers wird hier in der Regel allein die Flexion und Extension des Oberschenkels aktuiert da in diesem Freiheitsgrad die meiste Arbeit geleistet wird. Bei Exoskletten welche als Gehilfe eingesetzt werden, wird teilweise auch nur dieser Freiheitsgrad der Hüfte aktuiert (Argo ReWalk Exoskelett, Indego Exoskelett, NASA X1). Ein gelähmter Nutzer muss dann jedoch zusätzlich noch Krücken oder ähnliches benutzen um das Gleichgewicht zu steuern oder die Richtung zu beeinflussen. Bei Exoskletten, welche als „gehender Rollstuhl“ eingesetzt werden, und ohne Krücken auskommen, ist zumindest noch die Abduktion und Adduktion aktuiert (REX Exoskelett). Hier erfolgt die Steuerung beispielsweise mittels eines Joysticks. Bei bestehenden Exoskletten dieser Art sind die Bewegungsbläufe jedoch auffallend langsam, was an den verwendeten Motoren

- 10 -

und Getrieben liegen dürfte, und daran, dass der Nutzer nicht zu großen Kräften ausgesetzt werden darf, so dass sein Körper dem vorgegebenen Bewegungsablauf des Exoskeletts folgen kann.

- 5 Zurzeit wird das Hüftgelenk bisher nicht entsprechend seiner inhärenten Freiheitsgrade aktuiert. Stattdessen werden nicht anthropomorphe Mechanismen verwendet, welche wesentlich andere Transformationseigenschaften aufweisen, als die der drei unabhängigen Rotationsfreiheitsgrade des Hüftgelenks. So werden z.B. nur zwei Achsen verwendet, von denen eine in der Regel parallel zur transversal
- 10 Achse liegt und welche so ausgelegt ist, dass zumindest in der Nähe oder auch durch den Mittelpunkt des Kopfes des Femurs verläuft (BLEEX). Da entlang dieser Achse die meiste Arbeit beim Gehen und Laufen verrichtet wird, bei Flexion und Extension, ist dies auch die Achse die bei mobilen, aktuierten Exoskeletten vorzugsweise aktuiert ist.
- 15 Die andere bevorzugte Achse liegt parallel zur sagitalen Achse. Hier wird nicht unbedingt darauf geachtet, dass sie auch wirklich durch den Mittelpunkt des Kopfes des Femur verläuft (POWERLOADER PLL-01, <https://www.youtube.com/watch?v=vdhUpR-dzgk> ; FORTIS by Lockheed Martin
- 20 <http://robrady.com/design-project/lockheed-martin-fortis-human-powered-exoskeleton>; „Design of a Walking Assistance Lower Limb Exoskeleton for Paraplegic Patients and Hardware Validation Using Cop“, Jung-Hoon Kim et al., <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/42836.pdf>), obwohl dies eine ideale Wahl für einen anthropomorphen Mechanismus wäre. Da häufig auf eine dritte Hüftachse verzichtet wird (XOS 2 von Raytheon Sarcos), und stattdessen der „Oberschenkel“
- 25 oder „Unterschenkel“ des Exoskeletts so gestaltet werden, dass sie auch eine Rotation um die vertikale Achse erlauben und so ermöglichen, dass sich der Fuß entsprechend drehen kann, liegt ein im Wesentlichen nicht anthropomorpher Mechanismus vor. Daher kommt es bei der Bewegung des Beins zu erheblichen
- 30 Verschiebungen zwischen Körper des Nutzers und Hauptteilen des Exoskeletts. Diese Verschiebungen werden durch entsprechende nachgiebige Mechanismen, zusätzliche nicht aktuierte Gelenke, Polster, etc., an den Verbindungsstellen zwischen Exoskelett und Nutzer erlaubt („Exoskeleton for Walking Assistance“,

- 11 -

Qingcong Wu et al.). In diesem Fall eines im Wesentlichen nicht anthropomorphen Exoskeletts kann es daher sinnvoll sein, die Gelenke für die Bewegungen um die Sagitalachse in einer Weise zu gestalten (nicht durch den Kugelkopf), dass Spannungen und Verschiebungen in Grenzen gehalten werden, jedoch die

5 Anthropomorphizität weiter gesenkt wird („Exoskeleton for Walking Assistance“, Qingcong Wu et al). Somit lässt sich mit solchen Mechanismen auch nicht der gesamte Arbeitsraum des Menschen abdecken und sie konzentrieren sich auf wesentliche Bewegungen wie Gehen, Laufen und Sitzen. Hier wird nur ein kleiner Teil des möglichen Arbeitsraums eines Menschen benötigt und somit der mögliche

10 Bewegungsraum der einzelnen Gelenke nur in geringem Umfang genutzt.

Es ist die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, Exoskelette und Statthalter, wie Roboter und virtuelle Avatare, sowie zugehörige Steuereinheiten derart zu verbessern, dass mit ihnen umfangreiche Bewegungen möglich sind, sie somit

15 einen realistischen Eindruck vermitteln und außerdem schnell und effektiv betrieben werden können.

Diese Aufgabe wird gelöst durch die Vorrichtung nach Hauptanspruch 1. Durch die Unteransprüche werden weitere erfindungsgemäße Verbesserungen beansprucht.

20

Die in Anspruch 1 beschriebene Vorrichtung betrifft insbesondere Exoskelette, sowie Statthalter, wie Roboter oder virtuelle Avatare, sowie auch Bewegungssimulatoren und sonstige geeignete virtuelle oder reale Maschinen. Bei den Vorrichtungen der genannten Art sollen vielfältige Bewegungen und

25 Bewegungsabläufe erfasst und/oder umgesetzt werden. Deshalb sei darauf hingewiesen, dass die vorliegende Erfindung zwar hauptsächlich anhand eines Exoskeletts beschrieben wird. Sie ist jedoch keinesfalls darauf beschränkt sondern umfasst alle genannten Vorrichtungen.

30 Die Vorrichtung nach Anspruch 1 enthält, neben weiteren Mitteln, vier Elemente, wobei benachbarte dieser Elemente jeweils drehbar um entsprechende Achsen gelagert sind. Dazu sind zwischen benachbarten Elementen Drehgelenke vorgesehen, die vielfältig gestaltet sein können, wie beispielsweise als Schaft oder

- 12 -

dergleichen. Wesentlich dabei ist, dass die genannten drei Achsen im Wesentlichen durch einen gemeinsamen Punkt verlaufen. Bevorzugterweise liegt dieser Punkt im Mittelpunkt des zugehörigen - also des rechten bzw. linken - Hüftgelenks.

- 5     Dabei bildet die erste Drehachse mit der zweiten Drehachse einen ersten Winkel  $\varphi_1$  und die zweite Drehachse bildet mit der dritten Drehachse einen zweiten Winkel  $\varphi_2$ .

Diese Erfindung hat den Vorteil, dass sie ermöglicht, Exoskelette mit komplexen Freiheitsgraden, wie für das Hüftgelenk, möglichst anthropomorph zu gestalten und  
10     zu erlauben, dass alle Freiheitsgrade möglichst im gesamten Bewegungsbereich des Nutzers mit größeren Kräften, erhöhter Effizienz, geringem Platzbedarf und Gewicht, höheren Stellgeschwindigkeiten, höherer Leistung, mit Rückfahrfähigkeit (back-drivability), geringem Totgang und kurzen Reaktionszeiten aktivieren zu können.

15

Insbesondere wird es dadurch möglich, dass ein Exoskelett für die Beine in der Lage ist, das Körpergewicht des Nutzers zu tragen, während er es wie einen robotischen Anzug trägt, und das Exoskelett selbst durch eine Bewegungsplattform getragen und bewegt werden kann. Hierbei kann der Mechanismus nun so steif  
20     wirken, dass er dem Nutzer einen harten Boden und schnelle Bewegungen realitätsnah darstellen kann, ohne dass der Nutzer im Exoskelett tatsächlich auf einem Boden stehen würde. Ebenso wird die Leistungsfähigkeit von mobilen Exoskeletten und humanoiden Robotern gesteigert, da auch Freiheitsgrade aktiviert werden können, welche bisher nicht aktiviert werden konnten oder aus  
25     verschiedenen Erwägungen nicht aktiviert wurden. Die Anforderungen an die Energieversorgung werden gesenkt und/oder die Reichweiten und Anwendungsdauern verlängert. Bei stationären Exoskeletten zur physischen Rehabilitation kann so der trainierbare Bewegungsraum erhöht und die Wirksamkeit einer Behandlung erhöht oder andere Behandlungen als bisher ermöglicht werden.  
30     Durch die neue Geometrie des exoskeletalen Hüftgelenks, und auch durch seine neue Antriebsart, wird eine verbesserte Beweglichkeit von aktivierten Exoskeletten der Beine erreicht. Durch die Möglichkeit der Lokalisierung der Motoren in der Nähe der Gelenke werden Mittel zur Kraft und Leistungsübertragung eingespart und der

- 13 -

Mechanismus vereinfacht, im Vergleich zu z.B. Hydraulik-, Kabel- oder Bowdenzugübertragung. Der Hüftmechanismus kann vergleichsweise platzsparend ausgelegt werden und schränkt die verfügbare Nutzlast bei mobilen Exoskeletten wenig ein. Das weitgehend anthropomorphe Verhalten des Exoskeletts erlaubt

5 stabile Befestigung am Nutzer über weite Teile seines Körpers und erleichtert somit das Erzeugen von haptischem Feedback und die Nutzung taktiler Ein- und Ausgabeeinheiten. Ebenso wird die Verwendung eines Gehäuses, einer Panzerung, oder taktiler und thermischen Ein- und Ausgabeeinheiten erleichtert, auch bei gleichzeitiger Aktuierung aller Gelenke, welche den Körper des Nutzers

10 umschließen sowie auch das Exoskelett umschließen kann oder Teil des Exoskeletts sein kann.

Das erste Element, das auch Exo-Rückenplatte oder (Exo-) Hüftplatte genannt wird, ist bevorzugterweise ein plattenförmiges Element. Für den Normalbetrieb wird ein

15 Nutzer damit fest relativ zu seinem Hüftknochen verbunden. Obwohl Teile der Exo-Rückenplatte oder Exo-Hüftplatte abgewinkelt oder gewölbt ausgebildet sein können, weist sie eine Hauptebene auf. Bei einer Ausführung der erfindungsgemäßen Vorrichtung steht die erste der genannten Achsen senkrecht oder im Wesentlichen senkrecht auf der genannten Hauptebene und verläuft somit

20 im Wesentlichen parallel zu der Sagitalachse des Nutzers.

Es ist auch möglich, dass die erste Achse nicht senkrecht auf der Hauptebene des ersten Elements (Exo-Rückenplatte) steht, sondern davon abweicht, obwohl sie weiterhin im Wesentlichen durch den o.g. gemeinsamen Punkt verläuft. Diese

25 Abweichung lässt sich folgendermaßen beschreiben. In Normalstellung verläuft die Hauptebene der Exo-Rückenplatte von oben nach unten (oder umgekehrt) vertikal oder im Wesentlichen vertikal. Davon ausgehend lässt sich eine Vertikalachse definieren, die einerseits im Wesentlichen vertikal und parallel zu dieser Hauptebene und andererseits durch den gemeinsamen Punkt verläuft. Bei dieser

30 Ausführungsform der erfindungsgemäßen Vorrichtung ist die erste Achse um einen dritten Winkel  $\alpha$  um die genannte Vertikalachse gedreht, wobei dieser Winkel somit quasi in der Horizontalebene verläuft. Dadurch wird eine größere Drehung der Füße nach innen oder außen (bei negativem Winkel  $\alpha$ ) ermöglicht.

Es ist weiterhin möglich, dass die erste Achse um eine Horizontalachse um einen vierten Winkel  $\beta$  gedreht ist. Diese Horizontalachse verläuft im Wesentlichen senkrecht zu der genannten Vertikalachse, parallel zu der Hauptebene der Exo-  
5 Rückenplatte und auch durch den gemeinsamen Punkt. Die zugehörigen Vorteile dieser Ausführungsform werden im Rahmen der Beschreibung bevorzugter Ausführungsbeispiele genannt.

Bei einer bevorzugten Ausführung der Erfindung weist der erste Winkel  $\varphi_1$  einen  
10 Wert auf, der im Bereich von 25 - 45 Grad liegt. Besonders bewährt hat sich ein Wert von etwa 35 Grad.

Es hat sich außerdem bewährt, dass der zweite Winkel  $\varphi_2$  einen Wert aufweist, der im Bereich von 60 - 80 Grad liegt. Besonders bewährt hat sich ein Wert von etwa 70  
15 Grad.

Vorrichtungen mit der Kombination der Winkel  $\varphi_1$  und  $\varphi_2$  in den Bereichen wie in den vorherigen beiden Absätzen beschrieben ergeben Exoskelette, welche über einen großen Arbeitsraum verfügen, welcher generell große Schrittlängen, eine weite  
20 Außendrehung des Fußes und allgemein eine hohe Beweglichkeit erlauben. Diese Exoskelette sind besonders für die Steuerung von humanoiden Robotern und virtuellen Avataren mittels Teleoperation geeignet.

Sollte ein besonderes Augenmerk auch auf einfaches Sitzen in der realen Welt  
25 gelegt werden, bieten sich Exoskelette an, bei denen die Summe des ersten Winkels ( $\varphi_1$ ) und des zweiten Winkels ( $\varphi_2$ ) zwischen 85-120 Grad liegt und der erste Winkel ( $\varphi_1$ ) einen Wert in dem Bereich von 15-45 Grad hat.

Für den dritten Winkel  $\alpha$  und/oder für den vierten Winkel  $\beta$  haben sich Werte  
30 zwischen 10 und 30 Grad und bevorzugt etwa 20 Grad bewährt.

Weitere Ansprüche betreffen ein fünftes Element, das im Zusammenhang mit einem Exoskelett, einem Statthalter oder dergleichen auch als Fuß bezeichnet werden



- 15 -

kann. Dieser Fuß zeichnet sich dadurch aus, dass seine Standfläche, auf der der Nutzer steht (auch als Sohle bezeichnet) ein bestimmtes Profil aufweist. Dieses Profil ist geprägt durch zwei Kreissegmente mit unterschiedlichen Radien von Kreisen. Bevorzugterweise haben diese ihre Mittelpunkte in der Nähe des Sprunggelenks des Nutzers. Es ist außerdem bevorzugt, dass dieses Kreise parallel zur Frontalebene des Nutzers liegen. Damit wird ermöglicht, dass er wendige Bewegungen erlaubt, obwohl er nur über eine Achse verfügt. Es sei darauf hingewiesen, dass der Begriff Kreis hier und auch im Zusammenhang mit der Beschreibung bevorzugter Ausführungsbeispiele auch kreis-ähnliche Geometrien einschließt, wie auch Ellipsen oder dergleichen.

Der erfindungsgemäße Fuß, kann zusammen mit der zuvor beschriebenen erfindungsgemäßen Vorrichtung verwendet werden oder unabhängig davon. Das gilt auch für alle Ausführungsformen, die weiter unten im Rahmen der Beschreibung bevorzugter Ausführungsbeispiele erläutert werden.

Exoskelette oder Statthalter, wie humanoide Roboter benötigen zwei Freiheitsgrade des Fußes um der Beweglichkeit des Menschen nahe zu kommen. Die Aktuation beider Freiheitsgrade benötigt geeignete Mittel, die Platz und Gewicht benötigen. Je stärker und leistungsfähiger das Exoskelett sein soll, desto schwerer werden im Allgemeinen diese Aktuatoren und benötigen mehr Platz.

Durch die Wahl einer besonderen Sohlenform für die Füße von mobilen Exoskeletten werden die Anforderungen an die Aktuierung der Gelenke des Fußes des Exoskeletts reduziert und nur eine Achse aktuiert, wobei andere Bewegungen unterdrückt sind, und dennoch eine hohe Beweglichkeit des Nutzers mit Exoskelett gewährleistet. Da nun keine Freiheitsgrade des Fußes genutzt werden, um den Fuß des Exoskeletts durch menschliche Kraft direkt anzutreiben, wird die Belastbarkeit des Nutzers im Exoskelett erhöht und größere Kräfte und Leistungen können übertragen werden, ohne dass der Nutzer Gefahr läuft durch zu hohe Kräfte verletzt zu werden oder die nötigen Kräfte nicht mehr aufbringen zu können und daher die Kontrolle über den Bewegungsablauf zu verlieren.

- 16 -

Weitere Ansprüche betreffen das Gebiet der Schwerkraftkompensation (engl.: gravity compensation). Denn in teleoperativen Anwendungen muss das Exoskelett der Beine, welches an einer Hüft- oder Rückenelement mit einem Bewegungssimulator verbunden ist, in der Lage sein das Gewicht des Nutzers zu tragen. Er hat dann z.B. im Stand das Gefühl, dass sein gesamtes Körpergewicht auf seine Fußsohlen wirkt.

Es ist jedoch wünschenswert, dass der Nutzer auch den Eindruck erhalten kann, dass sein Körpergewicht reduziert ist. Das wäre z.B. dann der Fall, wenn er einen realen humanoiden Roboter steuert, welcher in einer Umgebung mit reduzierter Schwerkraft, wie im freien Fall, der Schwerelosigkeit, einem stabilen Orbit um einen Planeten, in beschleunigten Inertialsystemen oder unter Wasser, also unter Einfluss des Auftriebs agiert.

Ebenso treten solche entsprechenden Situationen reduzierter Schwerkraft in virtuellen Welten auf und ein Nutzer kann einen Avatar dort entsprechend steuern wollen. Der Nutzer sollte im Extremfall Schwerelosigkeit vermittelt bekommen können, so dass er ohne Kräfte auf seine Beine, den schwebenden Statthalter steuern kann. Ebenso kann vorgesehen sein, dass der Nutzer mit geringen eigenen Körperkräften überproportionale Kräfte mit einem Statthalter (realer Roboter oder virtueller Avatar) bewirken kann. Bei dieser Kraftverstärkung sollte sich der Nutzer im Exoskelett sich so fühlen können, als wenn er nicht mehr sein gesamtes Körpergewicht zu tragen hat. Es ist ebenso wünschenswert, dass der Nutzer andauernde, größere Kräfte als die seines Körpergewichts erfahren kann. So kann es nötig sein, dass diese großen Kräfte für längere Zeit, z.B. zur Vermittlung von erhöhter Schwerkraft, z.B. ganz auf seine Fußsohlen wirken. Der Nutzer befindet sich in der Regel jedoch tatsächlich im Schwerfeld der Erde, und er muss daran gehindert werden, dass er durch die wirkenden Kräfte der Exo-Beine tatsächlich seine Position ändert.

30

Teleoperative Methoden können im Allgemeinen auch Kräfte und Drehmomente skalieren. Um die Anforderungen an das Exoskelett zu reduzieren kann es wünschenswert sei, dass stets reduzierte Kräfte, vor allem die auf die Beine, an den

- 17 -

Nutzer vermittelt werden, und das Exoskelett nicht das ganze Gewicht des Nutzers tragen können muss. Dies erlaubt die Verwendung leichterer, weniger steifer, schwächerer und kleinerer Exoskelette und schnellere Bewegungen.

- 5 Bisher wurde die ganze oder teilweise Aufhebung der Schwere durch das Eintauchen des Nutzers im Exoskelett in eine Flüssigkeit erreicht. Alternativ trägt der Nutzer einen mit Flüssigkeit gefüllten Anzug, mit welchem er am Exoskelett befestigt ist, oder welcher Teil des Exoskeletts ist.
- 10 Ziel dieser erfindungsgemäßen Ausführung ist also, es dem Nutzer im Exoskelett zu ermöglichen den Eindruck von ganz oder teilweise aufgehobener Schwere zu vermitteln, ohne dass er sich dazu in einer Flüssigkeit befinden muss und/oder auch die Anforderungen an Exoskelette zu senken. Aufgabe ist des Weiteren erhöhte, andauernde Kräfte auf den Nutzer zu erlauben.
- 15 Das wird dadurch erzielt, dass geeignete Vorrichtungen, wie Gurte (wie Sechs- oder Fünfpunktgurte, Klettersitzgurte, etc.), Bänder, Schalen oder Geschirr den Torso, die Hüfte und/oder die Oberschenkel des Nutzers fest mit der Hüftplatte und/oder Rückenplatte des Exoskeletts verbinden, ohne die Bewegungsfreiheit seiner Beine
- 20 erheblich einzuschränken. Dazu sind insbesondere Gurte und Schalen geeignet, welche zwischen den Beinen und weit oben um die Hüfte angreifen. (Alternativ kann das Gewicht des Nutzers auch an den Oberschenkeln getragen werden, wobei der vermittelte Eindruck hierbei leidet.) Bevorzugt ist diese Tragevorrichtung so ausgelegt, dass sie das gesamte Gewicht des Nutzers in jeder beliebigen
- 25 Belastungsrichtung tragen kann ohne, dass sich der Nutzer erheblich im Verhältnis zu der Hüftplatte und/oder Rückenplatte verschiebt. Die Trageeinrichtung kann prinzipiell wie bei den Exobionics oder Indego Exoskeletten ausgelegt sein.

- Dann kann ein stehender Nutzer im Exoskelett, welches mit der
- 30 Bewegungsplattform verbunden ist, z.B. die Beine anziehen und beide vom Boden abheben, während sein Torso, gehalten vom Exoskelett und der Tragevorrichtung, die Position beibehält. Umgekehrt, ist es dann auch möglich, dass der Nutzer seine Beine völlig austrecken kann und eine Position einnimmt, die einem Stehen

- 18 -

entspricht, er aber dennoch nicht sein Körpergewicht mit seinen Beinen tragen muss und es auch nicht oder nur sehr gering als Belastung auf seine Fußsohlen wirkt.

Optional ist es vorgesehen, dass die Fußsohle des Exoskeletts in Richtung ihrer  
5 Normalen verschoben und aktuiert werden kann. Dadurch wird es möglich die Länge des Exo-Beines genau an die effektive Länge des Nutzerbeins anzupassen, und evtl. vorkommender leichte Fehler oder Änderungen in der Position des Nutzers relativ zur Hüftplatte und/oder Rückenplatte auszugleichen. Es ist vorteilhaft, wenn diese Aktuierung schnell geschehen kann, und Kräfte und  
10 Drehmomente auf die Platte oder Abstände zum Fuß gemessen und geregelt werden können. Es ist wichtig, das Gewicht des Nutzers möglichst gleichmäßig, mit geringem Druck und großer Kontaktfläche, auf seinen Torso (oder alternativ auf die Oberschenkel) zu verteilen. So wird verhindert, dass sie dem Nutzer zu sehr auffallen und der Eindruck der (teilweisen) Schwerelosigkeit wird verbessert.

15 Es ist im Allgemeinen wichtig, dass das Gewicht des Nutzers in jeder Richtung wirken kann und in jeder Richtung völlig von der Tragevorrichtung aufgenommen wird. So kann der Nutzer z.B. kopfüber gehalten werden, und dennoch eine fixe Position zur Hüftplatte und/oder Rückenplatte beibehalten. Je nach Anwendung  
20 kann die Tragevorrichtung jedoch so gestaltet werden, dass sie nur in die wesentlichen Richtungen wirkt.

Es ist möglich diese neue Art der Reduktion der Schwerkraft mit bisherigen  
Methoden unter Nutzung von Auftrieb in Flüssigkeiten zu kombinieren.

25 Wenn die Tragevorrichtungen so gestaltet sind, dass der Nutzer nicht nach oben aus der Hüftplatte oder Rückenplatte herausgedrückt werden kann, können auf die Füße des Nutzers auch andauernde Kräfte wirken, welche sein Körpergewicht übersteigen. Dadurch kann erhöhte Schwerkraft simuliert werden.

30 Die Tragevorrichtung selbst kann auch so gestaltet sein, dass sie entspannt oder bewegt werden kann und somit der Grad der Entlastung geändert werden kann. Dazu verfügt die Trageeinrichtung vorzugsweise an Ihren Befestigungspunkten über

Stellelemente, wie beispielsweise einstellbare Federelemente (auch Luftfedern oder dergleichen) und/oder geeignete Wägeelemente.

Die erfindungsgemäße Vorrichtung zur Schwerkraftkompensation kann zusammen  
5 mit den zuvor beschriebenen erfindungsgemäßen Vorrichtungen verwendet werden oder unabhängig davon. Das gilt auch für alle Ausführungsformen, die weiter unten im Rahmen der Beschreibung bevorzugter Ausführungsbeispiele erläutert werden.

Weitere Ansprüche betreffen eine Vorrichtung mit einem Motor, der im Betrieb über  
10 eine Spindel ein Mittel mit Gewinde translatorisch bewegt. Dieses ist mit einem umlaufenden Element, wie einer Kette oder dergleichen, verbunden, die dann eine Welle rotatorisch bewegt. Diese Antriebsvorrichtung ist besonders für die erfindungsgemäßen Vorrichtungen nach den sonstigen Ansprüchen geeignet, jedoch keinesfalls auf eine solche Verwendung beschränkt.

15 Die genannte Antriebsvorrichtung, die im Folgenden auch Aktuator genannt wird, hat folgende Eigenschaften und Vorteile.

Die Anforderungen an die Leistungsdichte, Gewicht, Drehmomente, mechanische  
20 Hysterese, Steifigkeit, Geschwindigkeit, Effizienz und Stellgenauigkeit sind bei humanoiden Exoskeletten enorm, wenn es Ziel ist die Leistung des Trägers bei mobilen Exoskeletten merkbar zu vergrößern, seine Kraft zu steigern, und insbesondere dann, wenn ein stationäres Exoskelett eingesetzt wird, um als  
25 Teleoperationseinheit für die Beine eingesetzt zu werden. Im letzten Fall treten schon bei einfachen Bewegungen Drehmomente von leicht deutlich über 100 Nm an fast allen Gelenken des Beines auf. Diese Drehmomente wirken teilweise sowohl auf die Aktuatoren, in ihren Antriebsrichtungen, aber auch orthogonal dazu, wobei sie im letzteren Fall die Lager und tragenden Strukturen belasten. Beim Laufen oder Springen werden diese Drehmomente noch um ein Vielfaches höher und auch die  
30 Latenzzeiten zur stabilen Kontrolle sinken und machen so eine schnelle und genaue Steuerbarkeit der Aktuatoren bei hohen Leistungen noch wichtiger. Auch wird hier die Rückfahrbarkeit der Aktuatoren wichtig, da im Grenzbereich kurzzeitig Kräfte auftreten können, welche die Möglichkeiten der Aktuatoren überschreiten können.

- 20 -

Je härter die entfernte reale oder simulierte Umgebung ist, desto weniger elastisch dürfen die Aktuatoren und die sonstige Struktur des Exoskeletts sein. Dies trifft insbesondere dann zu, wenn die Körperhaltungen von Statthalter (virtueller Avatar oder realer Roboter) sich stets nur wenig unterscheiden sollen.

5

Starke humanoide Roboter haben ähnliche Anforderungen, welche zunehmen, je schneller sie sich bewegen sollen, und besonders dann, wenn sie als Slaveeinheiten für Teleoperationen eingesetzt werden.

- 10 Auch Anwendungen welche z.B. serielle, elastische Aktuatoren (SEA, serial elastic actuator) verwenden, wie verschiedene mobile Exoskelette und humanoide Roboter, benötigen hohe Stellkräfte und große Drehwinkel von Gelenken. Hier sind die Aktuatoren „weich“ konstruiert und zwischen Endeffektor und Motor befindet sich zumindest ein Federelement (Torsionsfeder, Blattfeder, Schraubenzugfeder,
- 15 Schraubendruckfeder, etc.), welches es erlaubt schnelle Stöße aufzunehmen und durch den Motor so gespannt werden kann, dass eine gewünschte Antriebskraft erreicht wird.

- Die erfindungsgemäße Antriebsvorrichtung betrifft einen neuen Aktuatortyp für
- 20 Exoskelette, Roboter oder dergleichen. In der bevorzugten Ausführungsform des Aktuators wird ein bürstenloser Elektromotor genutzt um eine Kugelumlaufspindel bevorzugt direkt anzutreiben. Motor und Spindel sind über geeignete Lager oder Klammern mit einer Basis (Basisplatte, Rahmen, Gestell oder Gehäuse; ein Teil oder mehrere) so verbunden, dass sie beim Auftreten äußerer Kräfte nicht
- 25 gegeneinander verschoben werden können und Motor und Spindel sich frei um ihre Antriebsachsen drehen können. Der Motor ist so, direkt oder indirekt befestigt, dass er Arbeit an der Spindel verrichten kann. Die Basis ist mit einem ersten Element des Exoskeletts (z.B. Oberschenkel) verbunden oder bildet eine Einheit mit ihm. Die Spindel treibt bei ihrer Drehung eine passende, kugelgelagerte Mutter (auch Nuss
- 30 genannt) an, welche so mit der Basis verbunden ist, dass sie sich nicht um ihre longitudinale Achse drehen kann, wenn die Kugelumlaufspindel gedreht wird. Diese Befestigung der Mutter kann durch Linearschienen, Linearlager, Rollenlager mit Schienenführung, etc. erreicht werden. Bevorzugt ist die Führung durch einen

- 21 -

Linearwagen/Linearschlitten mit umlaufender Kugellagerung und „rechtwinkliger“ Führungsschiene. Dies erlaubt nur einen Freiheitsgrad und erlaubt die Aufnahme von Drehmomenten entlang aller Achsen. Bei Drehung der Kugelumlaufspindel durch den Motor führen die Mutter und der daran befestigte Schlitten dann eine lineare

5 Bewegung aus. Diese wird nun genutzt um ein (dort) parallel zur Spindel verlaufendes flexibles Element, wie Kette, Riemen, Gurt, Seil, etc. (im Folgenden vereinfacht nur „Kette“ genannt) anzutreiben. Die Kette ist mit geeigneten Mitteln direkt oder indirekt an der Nuss oder dem Schlitten befestigt. Schlitten, Nuss und Befestigungsmittel können eine Einheit bilden. Die Kette ist bevorzugt in der Art

10 offen ausgelegt, dass sie an beiden Enden der Nuss direkt oder indirekt befestigt wird, oder geschlossen ausgelegt, so dass sie an der Nuss befestigt wird ohne selber ein Ende oder einen Anfang zu haben. Sollte anstatt einer Kette ein Seil verwendet werden ist es bevorzugt auch am angetriebenen Rad verankert und kann dabei auch mehr als einmal ganz um das Antriebsrad geführt werden um Schlupf zu

15 vermeiden. Es können dann auch z.B. zwei Seile, eines für jede Antriebsrichtung, verwendet werden. Die Kette treibt ein Antriebsrad an, welches wiederum steif mit einer Antriebsachse verbunden ist. Die Kette und das Antriebsrad sind so miteinander verbunden, wie Kette und Zahnrad, dass auch bei großen Kräften zwischen diesen Teilen kein Schlupf auftritt. Die Antriebsachse ist so gelagert, dass

20 sie sich frei um ihre Longitudinalachse drehen kann, jedoch allen anderen Kräften widersteht und sich nicht relativ zur Basis oder Lager verschieben kann. Die Kette wird noch wenigstens um ein Umlenkelement - d.h. eine geeignete Umlenkeinrichtung, wie gelagertes Kettenrad, Gleitlagen, Umlaufrollen, etc. - geführt und von dort wieder zum Kettenrad der Antriebsachse, so dass die Kette einen

25 geschlossenen Pfad folgt. Ergänzend sei erwähnt, dass das Kettenrad und die Antriebsachse auch als ein gemeinsames Teil ausgebildet sein können.

Das freilaufende Element (Umlenkrad) ist so an der Basis befestigt, bevorzugt mittels einer kugelgelagerten Achse, dass die Kette, ggf. unter Mitwirkung eines

30 oder mehrerer weiterer Spannelemente, stets unter Spannung steht und bei Antrieb durch die Kugelumlaufspindel oder durch die Antriebsachse stets frei und spielarm entlang seines Laufpfades bewegen kann. Die Antriebsachse oder die angetriebenen Kettenräder/Seilrolle etc. sind so ausgelegt, dass an ihr ein anderes,

zweites Element des Exoskeletts (z.B. Unterschenkel) starr befestigt ist. Durch die Rotation der Antriebsachse oder der angetriebenen Kettenräder etc. wird somit der Winkel zwischen erstem Element (z.B. Oberschenkel) und zweitem Element (z.B. Unterschenkel) verändert.

5

Um höchste Leistungen und Drehmomente bei hohen Wirkungsgraden zu übertragen ist es nötig die kugelgelagerte Nuss auf der Kugelumlaufspindel hauptsächlich axial zu belasten, also die transversalen Drehmomente auf die Nuss zu minimieren. Dies ist, bei Verwendung einer einzigen Kette möglich indem sie  
10 möglich nah an der Kugelumlaufspindel und parallel dazu geführt wird. Hierdurch wird zwar keine perfekte axiale Last erreicht, dennoch können akzeptable Verluste erzielt werden. Durch die nötigen Lager für die Kugelumlaufspindel wird der minimale Abstand der Kette für kurze Kugelumlaufspindeln jedoch erhöht, sollte die Spindel etwa so lang oder kürzer sein als die gerade Kettenstrecke. Sollte die  
15 Spindel jedoch deutlich länger sein als die Länge der Kettenanordnung besteht keine Möglichkeit mehr, dass die Lager der Spindel mit der Kette oder den Kettenrädern in kollidieren könnten. Dann kann auch eine einzelne Kette sehr nahe an der Kugelumlaufspindel geführt werden, und so die Momente auf die Nuss gering gehalten werden.

20

Um jedoch eine perfekt axiale Belastung der Nuss und Umlaufspindel zu erreichen, muss die Last gleichmäßig auf unterschiedlichen Seiten der Nuss angreifen. Die bevorzugte Anordnung (Fig. 27-31) verfügt somit am Antriebsschaft über zwei Kettenräder gleichen Durchmessers, welche auch über zwei Umlenkeinrichtungen  
25 geführt werden. Die Kugelumlaufspindel und die daran befestigten Ketten liegen dann, in einem Teil des Verfahrbereichs der Nuss, in einer gemeinsamen Ebene. Die Nuss wird zwischen den Ketten geführt und ist direkt oder indirekt, wie mit einem Verbindungsblock (118) oder an den Linearlagern (120), mit den Ketten verbunden.

30

Es ist nicht immer wünschenswert, die Last auf die Nuss axial wirken zu lassen, da die notwendigen Bauteile auf mehreren Seiten der Nuss zusätzlichen Platz benötigen. Es ist möglich, dass die Last hauptsächlich einseitig auf die Nuss wirkt



- 23 -

wenn verhindert wird, dass sich die Nuss unter Wirken von transversalen Drehmoment zur Kugelumlaufspindel transversal verdrehen kann, also die Achse der Nuss und der Spindel nicht mehr parallel zueinander verlaufen und/oder die Spindel verbogen wird. Dazu kann die Nuss mit einer geeigneten Linearführung verbunden werden, welche bevorzugter Weise alle transversalen Drehmomente aufnimmt und ggf. auf die Basis oder andere Bauteile wirken lässt. Die Kette wird dann einseitig von der Nuss, dem Linearwagen, einem Verbindungsblock, einem Federelement, etc. angetrieben. Sollte zum Kettenantrieb ein Federelement genutzt werden wird es bevorzugt parallel und coaxial zu der Kette belastet. Je nach

10 aktuiertem Gelenk und Anwendung können die Drehmomente auf eine Linearführung noch immer extrem groß sein und die Belastbarkeit einzelner, kleiner Linearführungswagen/-lagern überschreiten. Dies trifft ins besonders dann zu, wenn alternierende Kugelgrößen oder Kugelnketten verwendet werden, um den Leichtlauf der Lager zu sichern. Daher ist es vorteilhaft, Lager, welche transversale

15 Drehmomente aufnehmen müssen, möglichst lang zu wählen, mehrere Lager hintereinander zu verwenden und geeignet miteinander, der Nuss und der Kette zu verbinden, und/oder mehr Linearführungen parallel laufen zu lassen, um gemeinsam die Drehmomente aufzunehmen. Im bevorzugten Ausführungsbeispiel, mit zwei Ketten, ist dies jedoch nicht nötig, da hier auf die Linearführung nur

20 minimale transversale Drehmomente und nur geringe axiale Drehmomente wirken.

Für viele Anwendungen ist es auch möglich eine sehr einfache Linearführung zu verwenden, welche die Hauptaufgabe hat, die Nuss an einer Drehung um Ihre Achse zu hindern. Dies kann z.B. durch einfache lineargeführte, runde Kugellager

25 geschehen welche direkt oder indirekt mit der Nuss verbunden sind. Dies trifft insbesondere dann zu, wenn das transversale Drehmoment auf die Nuss, durch die Verwendung von Ketten auf beiden Seiten, minimiert wird. Solch eine einfache Linearführung kann jedoch auch mit nur einseitigen Ketten ermöglicht werden, wenn eine Kugelumlaufspindel mit großem Durchmesser und/oder eine besonders lange

30 Nuss, oder mehrere Nüsse hintereinander, verwendet wird. Dann wird das transversale Drehmoment hauptsächlich von der Kugelumlaufspindel, und nicht von der Linearführung getragen, ohne Ihre Effizienz dramatisch zu reduzieren.

- 24 -

Es ist vorzuziehen, dass jede Linearführung nicht frei, sondern unterstützt ist. Das heißt, dass sie nicht nur an ihren Enden mit der Basis, Rahmen etc. verbunden ist, sondern über ihre ganze Länge oder große Teile ihrer Länge. Dadurch wird auch die Steifigkeit der Basis, etc. genutzt um Drehmomente aufzunehmen und die Nuss davon zu befreien.

Ketten, insbesondere Gelenkketten, besitzen bei hohen Leistungen und Kräften höchste Wirkungsgrade und benötigen wenig Platz. Gelenkketten haben jedoch im Allgemeinen die Eigenschaft, dass sie nie perfekt „rund“ laufen, da sich der effektive Durchmesser des Zahnrades beim Vorgang des Ein- und Ausgreifen eines Kettengliedes in das Zahnrad „chordal action“ leicht ändert. Dieser „Polygon-Effekt“ ist geringer je größer ein Zahnrad und je kleiner die einzelnen Glieder sind. Zahnketten (Silent Chains) sind so gestaltet, dass der genannte effektive Durchmesser fast konstant bleibt und der Polygoneffekt sehr gering ist. Bei „SmartChains“ (SmartChain B.V., Zoetermeer, Niederlande) ist der Polygoneffekt fast perfekt unterdrückt. Die Verwendung von weichen Kettenrädern aus Plastik oder radial flexiblen Kettenrädern mit federnder Gestaltung des Rades unter den Zähnen kann den Polygoneffekt reduzieren. Bei Seilen oder Riemen tritt ein Polygoneffekt nicht oder kaum auf.

Werden mehrere Ketten verwendet kann es vorteilhaft sein, die Zahnräder welche eine gemeinsame Achse teilen, zueinander verdreht anzubringen, so dass ein Phasenunterschied zwischen ihren Zähnen besteht. Sollten z.B. zwei Ketten verwendet werden, je eine auf einer Seite der Kugelumlaufspindel, so kann der Phasenunterschied die Hälfte der Zahnradteilung ( $180^\circ$ ) betragen. Werden zwei Zahnräder und Ketten auf jeder Seite verwendet so können zwei Räder auf derselben Seite einen Phasenunterschied von  $90^\circ$  zueinander haben. Die zwei Räder auf der anderen Seite haben dann vorzugsweise einen Phasenunterschied von  $180^\circ$  zu jeweils einem der Räder auf der ersten Seite. Wenn jeweils ein Rad auf einer Seite ein entsprechendes Rad auf der anderen Seite mit  $180^\circ$  Phasenunterschied gegenübersteht, wird die Gesamtheit der axiale Last auf die Nuss bestmöglich zeitlich gemittelt. Das transversale Drehmoment auf die Nuss hat jedoch noch immer deutliche Maxima und Minima. Dieser Einfluss auf das

- Drehmoment wird minimiert durch die Verwendung mehrerer Zahnradpaare, mit 2 Kettenblättern gleicher Phase zueinander auf derselben Achse, jedoch mit Phasenunterschieden zu den anderen Zahnradpaaren. Beispiele für mögliche Zahnradphasen für Systeme mit einseitigen Kettenanordnungen sind in der
- 5 folgenden Tabelle 1 gegeben, wobei die genannten Phasen nur beispielhaft sind, denn es ist eine Vielzahl weiterer Phasenunterschiede möglich. Dabei handelt es sich um eine Tabelle unterschiedlicher Phasen mit 1, 2 und 3 Ketten, welche einseitig auf die Nuss und oder Linearführung wirken. Somit wird der Polygoneffekt reduziert. Es wirken jedoch transversale Drehmomente auf die Nuss und/oder die
- 10 Linearführung. Bei geringen Kräften, starker Nuss und oder starker Linearführung kann jede dieser Phasenkonfigurationen praktikabel sein. Die Kette oder Ketten können in einer Ebene mit der Kugelumlaufspindel liegen (link oder rechts davon), können jedoch auch über oder unter der Kugelumlaufspindel laufen. Somit können Ketten entfallen oder Phasen abweichen ohne Erhebliche Einbußen in Kauf nehmen
- 15 zu können. Die Tabelle 1 kann sinngemäß auch für 4 oder mehr Ketten angewendet werden. Die Phasen in der Tabelle sind als Vielfache des Zahnabstandes (pitch) gegeben.

	Ketten		
	Kettenbezeichnung		
Anzahl Ketten	3	2	1
1			0
2		0	1/2
2		1/2	0
3	2/3	0	1/2
3	0	1/3	0
3	1/3	2/3	1/3
3	1/3	0	2/3
3	0	2/3	0
3	2/3	1/3	2/3

Tabelle 1

- 26 -

Es können jeweils einzelne Ketten oder spezielle mehrsträngige Ketten mit zueinander versetzten Gliedern (z.B. US 6,190,278 B1) verwendet werden. Letztere haben den Vorteil weniger Platz zu benötigen und einen gleichförmigeren Lauf zu ermöglichen.

5

Um den Einfluss des Polygoneffekt weiter zu reduzieren, wird der Schaftabstand zwischen Antriebsrad und Umlenkrad bevorzugt so gewählt, so dass die freie Länge des angetriebenen Kettenabschnitts stets genau ein Vielfaches der Kettenteilung beträgt.

10

Es ist möglich transversale Drehmomente auf die Nuss weiter zu reduzieren, indem beidseitig der Nuss jeweils eine Kette in gleichem Abstand zur Achse der Kugelumlaufspindel und mit gemeinsamer Phase verläuft. Weitere Kettenpaare dieser Art, aber mit gleichmäßigem Phasenunterschied zu den anderen Paaren,

15

können verwendet werden, um dann den Lauf gleichmäßiger zu gestalten, da so die Antriebskraft geglättet wird. In der folgenden Tabelle 2 sind entsprechende Beispiele für zweiseitige Kettenanordnungen gegeben. Darin enthalten sind alle

20

Permutationen der Phasen für 2, 4 und 6 Ketten für welche das transversale Drehmoment, die Summe der einzelnen transversalen Drehmomente aller Ketten, auf die Nuss und/oder Linearführung minimiert werden. Je mehr Ketten verwendet werden, desto entbehrlicher wird jede einzelne Kette und die genaue Wahl der Phasen. Somit können Ketten entfallen oder Phasen abweichen ohne erhebliche Einbußen in Kauf nehmen zu können. Die Tabelle 2 kann sinngemäß auch für 4 oder mehr Ketten auf jeder Seite angewendet werden.

25

- 27 -

	Ketten					
	Links			Rechts		
Kettenbezeichnung:	3L	2L	1L	1R	2R	3R
Anzahl Ketten						
2			0	0		
4		1/2	0	0	1/2	
4		0	1/2	1/2	0	
6	2/3	1/3	0	0	1/3	2/3
6	0	2/3	1/3	1/3	2/3	0
6	1/3	0	2/3	2/3	0	1/3
6	1/3	2/3	0	0	2/3	1/3
6	0	1/3	2/3	2/3	1/3	0
6	2/3	0	1/3	1/3	0	2/3

Tabelle 2

- Obwohl durch diesen Mechanismus, bei gegebener Anzahl von Ketten und Kettenrädern, weniger Phasen benutzt werden da immer zwei Ketten die gleiche Phase haben, kann, durch die Reduktion des transversalen Drehmomentes auf die Nuss, ein gleichförmigerer Lauf erreicht werden. Die Verwendung von „Phased Chains“ ist einer Verwendung einzelner Ketten vorzuziehen. Sie werden vorzugsweise paarweise für Paare von Kettenblättern mit einem Phasenunterschied des halben Gliedabstandes eingesetzt. Dazu müssen die Kettenblätter entsprechend paarweise auf den Achsen angeordnet sein. Zahnketten („Silent Chains“) haben Vorteile gegenüber Rollenketten. Eine Phased Chain ersetzt dann mehrere der zuvor erwähnten Einzelketten.
- Der Einfluss durch transversale Drehmomente der Ketten auf die Nuss kann dadurch reduziert werden, dass die Nuss direkt oder indirekt mit dem Wagen einer Linearführung verbunden ist, so dass transversale Drehmomente durch diese

- Führung aufgenommen werden. Die Kette oder Ketten können auch mit dem Wagen der Linearführung selbst verbunden werden. Die Nuss kann auch so gestaltet sein, dass sie die Eigenschaften des Wagens übernimmt und selbst über Rollen, Lager, Räder etc. verfügt welche wiederum auf einer Linierschiene laufen welche die
- 5 transversalen Drehmomente aufnimmt. Jede dieser Schienen ist im Allgemeinen auch geeignet longitudinale Drehmomente der Nuss aufzunehmen, was Voraussetzung dafür ist, dass die Nuss bei der Drehung der Spindel hysteresefrei entlang der Kugelumlaufspindel wandert und nicht am Ort verweilt.
- 10 Um möglichst hysteresefrei zu arbeiten müssen die Ketten, oder andere flexible Elemente, vorgespannt werden. Dazu wird vorzugsweise die Achse der Umlenkkettenräder so gelagert, dass sie entlang der Richtung der Kugelumlaufspindel verschiebbar ist. Alternativ können auch weitere, freilaufende Umlenkräder verwendet werden, deren Position so verstellbar sind, dass die
- 15 Vorspannung geregelt werden kann. Ketten haben den Vorteil, besonders gegenüber Seilen, dass sie nur wenig Vorspannung benötigen um hysteresefrei zu arbeiten.
- Für die Erzielung eines großen Übersetzungsverhältnisses (kleine Motormomente sollen zu großen Momenten der angetriebenen Achse werden) wird ein großer
- 20 Antriebsraddurchmesser und eine geringe Steigung der Kugelumlaufspindel benötigt. Dies führt bei einem gegebenen abzudeckenden Rotationswinkel der angetriebenen Achse zu größeren notwendigen Strecken, über welche die Kette geradlinig geführt werden muss. Dies führt bei großen Rotationswinkeln und großen
- 25 Übersetzungen zu großen nötigen Längen der Kugelumlaufspindeln und dadurch zu einer großen Aktuatorlänge. Dieses kann besonders beim Antrieb der dritten Achse 95 des Exoskeletts (Fig. 1-26), welche die Flexion und Extension des Oberschenkels steuert, problematisch werden, da hier große Drehmomente und große Drehwinkel benötigt werden.
- 30 Das Übersetzungsverhältnis von Kugelumlaufspindel zu angetriebener Achse ist
- $$\text{Steigung der Kugelumlaufspindel} / (\text{Umfang angetriebenes Kettenrad})$$
- $$= \text{pitch} / (2 \pi r).$$

- 29 -

5 So erzielt man mit einem Kettenrad von 150 mm Durchmesser und einer Kugelumlaufspindel mit 5 mm Steigung eine Untersetzung von etwa 1:94. Für praktisch alle möglichen Steigungen der Kugelumlaufspindel ist eine einfache Rückfahrbarkeit (back drivability) des Mechanismus gegeben.

10 Statt einer Kugelumlaufspindel und einer kugelgelagerten Nuss können andere Mittel, wie eine ACME Schraube etc. verwendet werden. Dann kann jedoch die Rückfahrbarkeit verloren gehen und der Wirkungsgrad sinken.

15 Zwischen Motor und Spindel kann noch ein Getriebe geringer Untersetzung geschaltet werden, um die gesamte Untersetzung ohne Verlust der Rückfahrbarkeit zu verbessern um größere Drehmomente an der angetriebenen Achse zu erzielen. Es ist auch möglich die angetriebene Achse nicht direkt zum Antrieb eines Robotergelenks zu nutzen, sondern mit ihr ein weiteres Zahnrad anzutreiben, welches ein Kettengetriebe antreibt, was letztlich ein Gelenk aktuiert. Ähnliches kann mit Riemen, Seilen, oder Zahnrädern etc. erreicht werden.

20 Ebenso kann die Kugelumlaufspindel an beiden Enden von zwei Motoren angetrieben werden, um die Leistung, Beschleunigung und Drehmoment zu erhöhen. Die Motoren können auch auf einer Seite der Spindel in Serie geschaltet werden, indem ihre Achsen longitudinal miteinander verbunden werden. Dies ist äquivalent zu einem längeren Motor.

25 Die Kugelumlaufspindel kann auch so gestaltet werden, dass die von innen durch einen Motor angetrieben wird, bzw. die Außenseite eines Motors die Führungen einer Kugelumlaufspindel hält. Dies hat den Vorteil, dass die ganze Länge der Spindel als Motor genutzt werden kann und der Aufbau insgesamt kürzer wird.

30 Die Motoren, oder der Motor müssen nicht unbedingt coaxial zur Kugelumlaufspindel angebracht sein. So ist es möglich zwischen Motor und Kugelumlaufspindel eine Kardanwelle zu verwenden, ein Kegelradgetriebe, ein

- 30 -

Hypoidgetriebe, ein Zahnriemenantrieb, oder ähnliches. So kann die Lage des Motors im Gehäuse beeinflusst werden, und die Gehäusegröße verringert werden. Auch kann so die Untersetzung weiter beeinflusst werden. Direkt am Motor sind die auftretenden Drehmomente und Kräfte im Allgemeinen noch am geringsten, so dass  
5 sich hier relativ einfache und kostengünstige Mittel zur Untersetzung, Leistungsübertragung und Achsrichtungsänderung eignen.

Generell ist es vorzuziehen die Kugelumlaufspindel an ihren beiden Enden mit Festlagern an der Basis zu befestigen. Dies erhöht die axiale Belastbarkeit (buckling  
10 load) um einen Faktor 2 im Vergleich zu einem Festlager auf einer Seite und einer „axial freien“ oder „supported“ Lagerung auf der entgegengesetzten Seite. Dadurch werden maximale Beschleunigungen und Geschwindigkeiten und Resonanzfrequenzen erheblich erhöht. Es gibt dann keinen Unterschied zwischen Betrieb in Zugrichtung oder Schubrichtung. Auch werden Kräfte gleichmäßiger auf  
15 die Basis übertragen.

Die erfindungsgemäße Antriebsvorrichtung (Aktuator) kann zusammen mit den zuvor beschriebenen erfindungsgemäßen Vorrichtungen verwendet werden oder unabhängig davon. Das gilt auch für alle Ausführungsformen, die weiter unten im  
20 Rahmen der Beschreibung bevorzugter Ausführungsbeispiele erläutert werden.

Weitere Ansprüche betreffen einen Bewegungssimulator und zwar insbesondere dessen Rotationseinheit. Diese besteht aus mindestens drei Rotationselementen, wobei benachbarte Elemente untereinander drehbar verbunden sind. Das erste  
25 Rotationselement ist drehbar an weiteren Vorrichtungen gelagert, wie an Mitteln einer Translationseinheit. An dem letzten, wie beispielsweise dem dritten Rotationselement ist ein Exoskelett oder dergleichen drehbar gelagert. Dieser erfindungsgemäßen Vorrichtung liegen folgende Erkenntnisse zugrunde.

30 Exoskelette für die Teleoperation, also zur Kontrolle von Statthaltern in einer virtuellen (Avatare) oder realen Umgebung (humanoide Roboter), benutzen Bewegungssimulatoren um statische oder zeitlich veränderliche



- 31 -

Körperbeschleunigungen auf den Nutzer auszuüben. Dazu werden auch kardanische Aufhängungen (engl.: gimbal) eingesetzt.

- Dazu sind insbesondere Systeme mit vier unabhängigen Achsen nötig, um den Effekt des "gimbal lock" zu vermeiden. Dieser Zustand tritt auf, wenn bei bestimmten
- 5 Stellungen der Achsen zueinander, besonders im Falle von zueinander parallelen Achsen oder wenn mehr als zwei Achsen in einer gemeinsamen Ebene liegen, Freiheitsgrade verloren gehen. In der Nähe dieser Zustände können die nötigen Stellgeschwindigkeiten der Achsen sehr hoch oder beliebig hoch werden um von einer Orientierung des Nutzers, auch langsam, zu einer anderen überzugehen.
- 10 Bei kardanischen Aufhängungen mit nur drei Achsen kann dieser Effekt es technisch und praktisch unmöglich machen, dass der Nutzer, gesteuert durch die Elektronik des Bewegungssimulators, bestimmte Bereiche von Orientierungen im Raum einnehmen kann, um einen geeigneten Raumlage oder Beschleunigungseindruck zu erfahren.
- 15 Wenn vier Achsen verwendet werden, können diese geeignet gesteuert werden, so dass stets drei Freiheitsgrade verfügbar sind, und keine extremen Geschwindigkeiten oder Beschleunigungen nötig sind. Ein solches System besteht im Allgemeinen aus 3 Elementen welche jeweils über 2 Achsen und zusammen über 4 unabhängige Achsen verfügen. Ein solches System ist im Allgemeinen
- 20 größer und schwerer als eines mit nur 3 Achsen. Dies trifft ins besonders dann zu, wenn jedes Element einen Vollkreis oder Halbkreis umschreibt. Diese Elemente sind dann auch besonders träge und widerstehen rotatorischen und translatorischen Beschleunigungen. Entsprechendes gilt für elliptische oder andere Formen mit großen Winkelabständen. Außerdem addieren sich Fehler in den Stellwinkeln
- 25 besonders, wenn die Achsen jedes Elements große Winkel zueinander einnehmen. Diese Winkel werden in der Regel als  $90^\circ$  gewählt. Es ist besonders dann wichtig, wenn das innerste Element einen Voll- oder Halbkreis ähneln sollte, dass es groß genug im Durchmesser ist, dass der Nutzer nie damit kollidieren kann.
- Bei dem erfindungsgemäßen Bewegungssimulator ist eine besondere kardanische
- 30 Aufhängung enthalten. Die Summe der Elementwinkel (Winkel der zwei Achsen eines Elements zueinander) muss größer als  $180^\circ$  sein, um einen gimbal lock zu

- 32 -

vermeiden und um zu erlauben, dass der Nutzer im Exoskelett, alle möglichen räumlichen Orientierungen einnehmen kann.

Der erfindungsgemäße Bewegungssimulator kann zusammen mit den zuvor  
5 beschriebenen erfindungsgemäßen Vorrichtungen verwendet werden oder unabhängig davon. Das gilt auch für alle Ausführungsformen, die weiter unten im Rahmen der Beschreibung bevorzugter Ausführungsbeispiele erläutert werden.

Weitere Ansprüche betreffen eine Bewegungsplattform, wie insbesondere eine  
10 besondere Ausgestaltung eines Hexapods (hier auch Stewart-Plattform genannt). Erfindungsgemäß ist eine bewegliche Arbeitsplattform vorgesehen, die von Aktuatoren bewegt werden kann. Im Inneren dieser Arbeitsplattform ist ein Exoskelett befestigt und zwar bevorzugterweise derart, dass der zugehörige Nutzer etwa zwischen den Befestigungspunkten der Aktuatoren am Rahmen zentriert ist.

15 Bei einer Weiterbildung der erfindungsgemäßen Plattform ist vorgesehen, dass zwischen den Aktuatoren und der Arbeitsplattform Stützen vorgesehen sind. Diese sollten lang sein, um den Arbeitsraum des Bewegungssimulators zu vergrößern bzw. zu maximieren. Dabei liegen außerdem folgende Erkenntnisse zugrunde.

20 Als Bewegungsplattformen für Exoskelette in Teleoperationen (virtuell oder realer Statthalter) sind auch Stewart-Plattformen geeignet. Diese verfügen im Allgemeinen über sechs Linearaktuatoren, oder ähnliche Mittel, welche auf einer Seite am Boden oder einer anderen Basis befestigt sind, und auf der anderen Seite an einer  
25 Arbeitsplattform oder Arbeitsebene. Durch geeignete, koordinierte Aktuation der Linearaktuatoren, kann die Arbeitsplattform frei in sechs Freiheitsgraden im Raum aktuiert und beschleunigt werden. So können beliebige lineare oder rotarische Positionen, Geschwindigkeiten und/oder Beschleunigungen der Plattform erzeugt werden. Wird der Nutzer im Exoskelett nun an einer Stewart Plattform befestigt,  
30 kann jede Körperbeschleunigung des Statthalters auf den Nutzer, auch mittels eines Motion Cueing Prozesses, übertragen werden.

- Stewart-Plattformen lassen nicht jede räumliche Orientierung zu. Sie verfügen jedoch über das Potential fast jede oder jede Gangart zu erlauben. Dazu muss die Technologie jedoch an die Anforderungen der Teleoperation mit Exoskeletten angepasst werden, um ihr Potential voll auszunutzen. Gewöhnliche Stewart-
- 5 Plattformen benötigen sehr viel Platz und sind hoch. Anwendungen in der Teleoperation mit Exoskeletten benötigen vor allem Rotationen um Punkte im Körper des Nutzers oder in dessen Nähe. Wenn der Nutzer jedoch auf der Arbeitsplattform einer Stewart-Plattform angebracht sein sollte, sind solche Rotationen zwar möglich, der Arbeitsbereich der Stewart-Plattform ist dann jedoch
- 10 gering und es werden große Stellwege und Stellgeschwindigkeiten benötigt. Es ist vorteilhaft, wenn die Zentren der Rotationen etwa im Schwerpunkt zwischen den Befestigungspunkten der Linearaktuatoren an der beweglichen Arbeitsplattform liegen.
- 15 Die erfindungsgemäße Bewegungsplattform kann zusammen mit den zuvor beschriebenen erfindungsgemäßen Vorrichtungen verwendet werden oder unabhängig davon. Das gilt auch für alle Ausführungsformen, die weiter unten im Rahmen der Beschreibung bevorzugter Ausführungsbeispiele erläutert werden.
- 20 Weitere Einzelheiten und Vorteile der vorliegenden Erfindung werden im Folgenden anhand von bevorzugten Ausführungsbeispielen mit zugehörigen Abbildungen erläutert. Dabei zeigen:
- Fig. 1 eine perspektivische Darstellung von einem Exoskelett 1000
- 25 Fig. 2 eine Draufsicht auf das Exoskelett 1000
- Fig. 3 - 5 Veranschaulichung verschiedener Winkel bei Exoskelett 1000
- Fig. 6 - 11 verschiedene Darstellungen von Exoskelett 1001
- Fig. 12 - 17 verschiedene Darstellungen von Exoskelett 1002
- Fig. 18 - 23 verschiedene Darstellungen von Exoskelett 1003
- 30 Fig. 24 - 26 verschiedene Darstellungen des geteilten zweiten Elements (82a-c)
- Fig. 27 - 31 verschiedene Darstellungen des Aktuators 2001
- Fig. 27 - 31 verschiedene Darstellungen des Aktuators 2001
- Fig. 32 Seitenansicht von Aktuator 2002

- Fig. 33 - 37 verschiedene Darstellungen des Aktuators 2003  
Fig. 38 - 41 verschiedene Darstellungen des Aktuators 2004  
Fig. 42, 43 verschiedene Darstellungen des Aktuators 2005  
Fig. 44 - 46 verschiedene Darstellungen des Aktuators 2006  
5 Fig. 47 - 49 verschiedene Darstellungen des Aktuators 2007  
Fig. 50 - 52 verschiedene Darstellungen des Aktuators 2008  
Fig. 53 - 54 verschiedene Darstellungen des Aktuators 2009  
Fig. 55 - 58 verschiedene Darstellungen des Bewegungssimulators 3000  
Fig. 59 das Exoskelett 203 mit Rückenhalterung  
10 Fig. 60 - 63 verschiedene Darstellungen des Fußes 9000  
Fig. 64, 65 verschiedene Darstellungen der Stewart-Plattform 4000

Fig. 1 zeigt eine perspektivische Darstellung eines bevorzugten Ausführungsbeispiels für ein Exoskelett 1000. Dieses enthält ein erstes Element  
15 80a, das auch Exo-Rückenplatte genannt wird und im Normalbetrieb fest relativ zum Hüftknochen eines Nutzers befestigt wird. Diese Exo-Rückenplatte 80a enthält im unteren Bereich auf jeder Seite je eine Achsbefestigungsregion 80b, die hier schräg nach innen gewölbt sind und auch als Befestigungselemente 80b bezeichnet werden. An jedem dieser Befestigungselemente 80b ist ein zweites Element 82  
20 mittels eines Schaftes 81 drehbar befestigt. Über einen weiteren Schaft 83 (s. Fig. 2) ist ein drittes Element 84, bestehend aus den beiden Schenkeln 84a, 84b, mit dem zweiten Element 82 drehbar verbunden. Da die beiden Elemente 82, 84 die wesentlichen Funktionen eines Hüftgelenkes übernehmen, werden sie auch als erstes Exo-Hüftgelenk 82 bzw. als zweites Hüftgelenk 84 bezeichnet. Über einen  
25 weiteren Schaft 85 ist ein viertes Element 86 mit dem zweiten Exo-Hüftgelenk 84 drehbar verbunden, das auch als Exo-Oberschenkel bezeichnet wird. Unterhalb davon befindet sich ein fünftes Element 88, das auch als Exo-Unterschenkel bezeichnet wird und über einen Schaft 87 mit dem Exo-Oberschenkel 86 drehbar verbunden ist. Unterhalb davon ist ein fünftes Element 90, auch als Exo-Fuß  
30 bezeichnet, mittels eines Scharniergelenkes 89 drehbar mit dem Exo-Unterschenkel 88 verbunden.

Es sei darauf hingewiesen, dass das Exo-Skelett 1000 insofern spiegel-symmetrisch ist, als es die genannten Elemente, wie Exo-Hüftgelenk 82, 84, Exo-Oberschenkel 86, Exo-Unterschenkel 88 und Exo-Fuß 90 sowie die zugehörigen Gelenke 81, 83, 85, 87, 89, jeweils zwei Mal aufweist, nämlich je einmal auf der rechten und auf der linken Seite. Aufgrund der Anordnung der Exo-Füße 90 (Spitzen nach links unten) ist die übliche Vorwärts-Gehrichtung erkennbar. Diese ist bei dieser und auch bei folgenden Abbildungen für die Bezeichnungen „rechts“ und „links“ maßgeblich. Zur Verdeutlichung ist in Fig. 1 entsprechend „rechte Seite“ und „linke Seite“ angegeben. Es sei ferner darauf hingewiesen, dass bei den hier beschriebenen Ausführungsformen das erste Element 80a, 80b sowohl die Funktion als Exo-Rückenplatte als auch die Funktion als Exo-Hüftplatte aufweist. Deshalb werden hier beide Begriffe „Hüftplatte“ bzw. „Rückenplatte“ gleichermaßen verwendet. In anderen Ausführungsformen, auf die hier nicht näher eingegangen wird, kann eine separate Rückenplatte vorgesehen sein, um den Rücken zu aktiveren. Dann kann sich die Hüfte durch Änderung des Gelenkwinkels zwischen Hüfte und Wirbelsäule relativ zum Rücken bewegen.

Fig. 2 zeigt eine Draufsicht auf das Exoskelett 1000, wobei insbesondere dessen Elemente dargestellt sind, die sich auf dessen linker Seite befinden. Neben den beschriebenen Elementen sind in Fig. 1 und 2 auch einige Achsen eingezeichnet, die sich insbesondere aufgrund der Anordnungen der Schäfte 81, 83, 85, 87 und 89 ergeben. Darauf wird im Folgenden näher eingegangen.

Wie in Fig. 1 und 2 dargestellt, verläuft eine erste Achse 93 durch den Schaft 81, so dass das erste Exo-Hüftgelenk 82 bezogen auf die Rückenplatte 80a bzw. das zugehörige rechte bzw. linke Befestigungselement 80b um die erste Achse 93 drehbar ist. In Fig. 1 ist die erste Achse 93 sowohl rechts als auch links gekennzeichnet. Weitere Achsen sind in Fig. 1, 2 üblicherweise nur auf der rechten oder der linken Seite eingezeichnet bzw. markiert - und zwar abhängig davon, wo die entsprechende Achse am besten erkennbar ist. Eine zweite Achse 94 ist durch die Anordnung des Schaftes 83 definiert. Dadurch kann sich das zweite Exo-Hüftgelenk 84 bezüglich des zugehörigen ersten Exo-Hüftgelenks 82 um diese Achse 94 drehen. Eine dritte Achse 95 ist durch die Anordnung des Schaftes 85

- 36 -

definiert. Dadurch kann sich der Exo-Oberschenkel 86 bezüglich des zugehörigen zweiten Exo-Hüftgelenks um die dritte Achse 95 drehen. Entsprechend sind

- eine vierte Achse 96 zwischen dem Exo-Oberschenkel 86 und dem Exo-Unterschenkel 88 aufgrund der Anordnung des Schaftes 87 und
- 5        - eine fünfte Achse 97 zwischen dem Exo-Unterschenkel 88 und dem Exo-Fuß 90 aufgrund des Schaftes 89

festgelegt.

Die vierte Achse 96 liegt in Neutralstellung (gerade, aufrechte Körperhaltung; so wie  
10        in Fig. 1 dargestellt) parallel oder nahezu parallel zur mediolateralen Achse oder Achse des Knies des Nutzers und führt durch dessen Kniegelenk.

Die fünfte Achse 97 liegt in Neutralstellung (s. Fig. 1) parallel oder nahezu parallel zur mediolateralen Achse oder der Achse des Sprunggelenks und führt durch das  
15        menschliche Sprunggelenk.

Wie aus Fig. 1 und 2 erkennbar, sind die Schäfte 81, 83, 85 derart angeordnet, dass die zugehörigen Achsen 93, 94, 95 durch einen Punkt 91 auf der rechten Seite bzw. einen Punkt 91 auf der linken Seite verlaufen (dieser ist in Fig. 2 auch durch einen  
20        gestrichelten Kreis umrandet). Diese Punkte 91 stellen die Mittelpunkte des rechten bzw. linken Hüftgelenks dar. In Fig. 1, 2 ist sowohl auf der rechten Seite als auch auf der linken Seite außerdem eine weitere Achse 92 eingezeichnet. Diese ist dadurch definiert, dass sie einerseits durch den Mittelpunkt 91 des zugehörigen rechten bzw. linken Hüftgelenks und andererseits parallel zur Sagitalachse verläuft.  
25        Die Achsen 92, 93, 94, 95 bzw. die zugehörigen Gelenke sind außerdem derart gestaltet und angeordnet, dass zwischen der ersten Achse 93 und der zweiten Achse 94 ein Winkel  $\varphi_1$  und zwischen der zweiten Achse 94 und der dritten Achse 95 ein Winkel  $\varphi_2$  definiert wird. Außerdem kann die erste Achse 93 mit der Achse 92 unter bestimmten Voraussetzungen einen Winkel  $\alpha$  bilden (s. Fig. 2),  
30        worauf weiter unten näher eingegangen wird.

Die Anordnung der Achsen 93, 94 und 95 bzw. der zugehörigen Gelenke bildet den Kern des Exo-Hüftgelenks. Diese Achsen sind drei voneinander unabhängige

- 37 -

Drehachsen, welche sich allesamt im Zentrum 91 des Hüftgelenks des Nutzers schneiden. Sie bilden so eine kardanische Aufhängung (englisch: gimbal) mit dem Zentrum des Hüftgelenks als Mittelpunkt.

- 5 Die Achsen 93, 94, 95 dieser kardanischen Aufhängung müssen nicht rechtwinklig zueinander stehen. Dies ist auch, abhängig vom geforderten Arbeitsraum des Mechanismus oder der gewünschten Art der Aktuierung, nicht immer möglich oder wünschenswert.
- 10 Die erste Achse 93 kann relativ zur Hüfte des Nutzers, oder äquivalent zu der Exo-Hüfte, je nach gewünschter Anwendung und Notwendigkeit, im Raum durch die Winkel  $\alpha$  und  $\beta$ , oder eine äquivalente Transformation, orientiert werden, wie in Fig. 3-5 dargestellt. Die erste Achse 93 verläuft jedoch immer durch den Mittelpunkt 91 des Hüftgelenks des Nutzers. Dazu muss der Abstand der Exo-Hüfte zum Nutzer
- 15 entsprechend justiert werden. Für  $\alpha=\beta=0$  liegt die erste Achse 93 parallel zur Sagitalachse und läuft durch den Mittelpunkt des Hüftgelenks 91. Für  $\alpha$  und/oder  $\beta$  ungleich Null erfolgt zunächst eine Rotation mit dem Winkel  $\alpha$  um die Vertikalachse und dann eine Rotation mit dem Winkel  $\beta$  um einen Vektor mit Aufpunkt in 91, welcher senkrecht zur Ebene steht, welche die Transversalebene senkrecht
- 20 schneidet und durch 92b läuft (entsprechend Fig. 4).

- Die bisherigen Figuren dienen hauptsächlich dazu, das Prinzip der vorliegenden Erfindung zu erläutern. In den folgenden Figuren sind mehrere Ausführungsbeispiele dargestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind dabei die
- 25 Referenzzeichen nur insoweit eingezeichnet, wie sie für das Verständnis notwendig sind.

- In Fig. 6 - 11 ist ein erstes bevorzugtes Ausführungsbeispiel abgebildet. Hier stehen die ersten Achsen 93 der linken und rechten Seite beide rechtwinklig auf dem ersten
- 30 Element 80a, sind parallel zur Sagitalachse und führen durch die Zentren der Oberschenkelköpfe. Durch alleinige Aktuierung um diese ersten Achsen 93 wird somit eine reine Abduktion und Adduktion des Oberschenkels ermöglicht. Bei dem ersten Ausführungsbeispiel haben die Winkel folgende Werte:

- 38 -

$$\varphi_1 = 35 \text{ Grad}; \varphi_2 = 70 \text{ Grad}; \alpha = 0 \text{ Grad}; \beta = 0 \text{ Grad}.$$

Fig. 6 und 7 zeigen verschiedene Ansichten eines Exoskeletts 1001 nach dem ersten Ausführungsbeispiel, wobei eine neutrale Haltung dargestellt ist.

- 5 Dabei stehen die dritten Achsen 95 in der neutralen Haltung parallel zur mediolateralen Achse. Sie sind somit für die reine Flexion und Extension des Oberschenkels verantwortlich.

- Die Wahl der dritten Achse 95 in dieser Richtung erleichtert die Aktuierung des  
10 Oberschenkels beim Gehen oder Laufen. Hier wird dann auch die meiste Arbeit geleistet und es liegen die größten Winkeländerungen vor.

- Die vierte Achse 96 und die fünfte Achse 97 stehen in der neutralen Haltung parallel zur mediolateralen Achse. Sie sind somit für die reine Flexion und Extension des  
15 Unterschenkels (vierte Achse 96) oder des Fußes (fünfte Achse 96) verantwortlich.

- Die Wahl der Lage der zweiten Achse 94 ist nicht trivial. Sie kann, für eine Anwendung im Gehen, Stehen und Laufen, nicht senkrecht durch das Hüftgelenk verlaufen (dann lägen alle drei Achsen in der neutralen Haltung rechtwinklig  
20 zueinander), da ein Scharniergelenk dann entweder im Oberkörper oder im Oberschenkel verortet sein müsste.

- In den Figuren 6 - 11 wurde die zweite Achse 94 so gewählt, dass ihr Gelenk unterhalb des Gelenkkopfes, hinter dem Nutzer, und auswärts angebracht wurde.  
25 Der Winkel zwischen der ersten Achse 93 und der zweiten Achse 94 beträgt  $\varphi_1=35^\circ$ . Der Winkel zwischen der zweiten Achse 94 und der dritten Achse 95 beträgt  $\varphi_2=70^\circ$ . In dieser Anordnung, mit Achse 93 parallel zur Sagitalachse, und mit der dritten Achse 95 der Hüfte, der vierten Achse 96 des Knies und der fünften Achse 97 des Fußes 90 parallel zur Transveralachse, ergibt sich aus der Winkelsumme von  $\varphi_1 + \varphi_2=105^\circ$  die maximale Innendrehung des Beines von  $\varphi_1 + \varphi_2 - 90^\circ = 105^\circ - 90^\circ = 15^\circ$ .  
30 Dann liegen alle Achsen 93-95 gleichzeitig in einer Ebene parallel zur Transversalebene. Die maximale Drehung des Beins um die vertikale Achse ist nicht so einfach zu bestimmen und hängt im Wesentlichen von der Form und Größe



der Elemente 80, 82, 84 ab. Wird angenommen, dass sich die einzelnen Teile durchdringen können, bzw. so gebaut sein sollten, dass sie sich nicht durchdringen oder miteinander kollidieren, dann beträgt die maximale Außendrehung des Fußes 90 im zuletzt beschriebenen Fall also

5 
$$- \varphi_1 + \varphi_2 - 90^\circ = -35^\circ + 70^\circ - 90^\circ = -55^\circ.$$

Die Differenz zwischen maximaler Innen- und Außendrehung beträgt  $2 \cdot \varphi_1 = 70^\circ$ .

10 Fig. 8 und 9 zeigen verschiedene Perspektiven des ersten Ausführungsbeispiels mit maximaler Innendrehung von 15 Grad und maximaler Außendrehung von ca. 45 Grad.

Fig. 10 und 11 zeigen ebenfalls verschiedene Perspektiven des ersten Ausführungsbeispiels mit einer maximalen simultanen Außendrehung von ca. 32  
15 Grad.

Das erste Ausführungsbeispiel ist die bevorzugte Ausführung. Sie ermöglicht fast jede, auch extreme Körperhaltungen und Bewegungen. Das umfasst Gehen, Laufen, Rennen, Springen, Kehrtwende auf der Stelle, tiefen Ausfallschritt,  
20 Seitschritte, Überkreuzschritte, Nahkampf, Sitzen auf Stühlen oder Bänken und anderes. Der Aufbau 1 ermöglicht eine weite Amplitude der Außendrehung der Füße (45° Außendrehung, 15° Innendrehung). Es lassen sich gemäß der Notwendigkeiten einer Anwendung andere Aufbauten realisieren.

25 Wie bereits oben erwähnt, muss die erste Achse 93 nicht unbedingt parallel zur Sagitalachse verlaufen. Insbesondere kann es nützlich sein, sie um die Vertikalachse so zu drehen, dass die Drehung der Füße nach innen um die Vertikalachse über einen größeren Bereich möglich wird. Darauf bezieht sich das zweite Ausführungsbeispiel, das mithilfe der Figuren 12 - 17 beschrieben wird und  
30 das folgende Winkel aufweist:

$$\varphi_1 = 35 \text{ Grad}; \varphi_2 = 70 \text{ Grad}; \alpha = 20 \text{ Grad}; \beta = 0 \text{ Grad}.$$

- 40 -

Fig. 12 und 13 zeigen ein Exoskelett 1002 gemäß dem zweiten Ausführungsbeispiels in neutraler Haltung.

Fig. 14 und 15 zeigen das Exoskelett 1002 mit maximaler Innendrehung von 35 Grad und maximaler Außendrehung von 35 Grad.

Fig. 16 und 17 zeigen das Exoskelett 1002 mit maximaler simultaner Außendrehung von ca. 28 Grad.

Das zweite Ausführungsbeispiel demonstriert, wie durch Wahl eines  $\alpha > 0^\circ$  die maximale Innendrehung des Fußes 90 erhöht werden kann. Außerdem sieht man in Fig. 15, dass der maximale Verfahrbereich des zweiten Elements 82 erhöht wird, und somit auch das theoretische Maximum der Außendrehung des Fußes 90 erreichbar wird. Im ersten Ausführungsbeispiel war diese Drehung noch dadurch begrenzt, dass das zweite Element 82 mit dem Element 1 kollidieren konnte. Somit wurden statt der theoretisch maximalen Außendrehung von  $55^\circ$  nur  $45^\circ$  erzielt. Das zweite Ausführungsbeispiel ermöglicht es daher, z.B. schneller, bei vollem Bodenkontakt ohne Gleiten, die Gehrichtung zu wechseln als das erste Ausführungsbeispiel.

Bei dem Exoskelett 1002 wird jedoch automatisch auch die maximale Drehung der Füße 90 um die Vertikalachse nach außen um den gleichen Betrag verringert. Bei der Drehung nach Außen ist die Quantifizierung des maximalen Winkels wieder abhängig von der Größe und Beschaffenheit besonders der Elemente 80a, 82, 84, da sie, abhängig von den gewählten Winkeln und Ihrer spezifischen sonstigen Geometrie, kollidieren können. Dies ist bei dem zweiten Ausführungsbeispiel jedoch nicht der Fall (siehe insbesondere Figur 15, rechtes Bein). Die maximal mögliche Drehung des Fußes nach innen und außen beträgt hier jeweils  $35^\circ$ .

Um eine möglichst weite Abduktion des Oberschenkels zu erlauben ist es nötig, einen lateralen Abstand zwischen dem Oberschenkel oder der Hüfte des Nutzers und der nächsten Bauteile an der dritten Achse 95 einzuhalten. Diese Teile drehen sich bei Abduktion des Beines, also einer Drehung vorwiegend um die erste Achse

- 41 -

93, kreisförmig um den Mittelpunkt des Kopfes des Femur. Diese Kreise schneiden auch die Teile des Oberkörpers (Hüfte und aufwärts). Je größer der Radius dieser Kreise zwischen Zentrum des Hüftgelenks und innersten Teil entlang der dritten Achse 95 ist, desto größer ist der maximale Abduktionswinkel des Beines. Ebenso  
5 sollte die Exo-Platte 80a schmal (in lateraler Richtung) gehalten werden, so dass sie bei weiter Abduktion des Beines nicht mit dem dritten Element 84 in Konflikt gerät.

Der Exo-Oberschenkel 86 ist in der bevorzugten Ausführungsform an der Außenseite des Beins des Nutzers angebracht. Das dritte Element 84 ist entlang der  
10 dritten Achse 95 dann distal an dem Exo-Oberschenkel 86 befestigt. Das heißt der Oberschenkel ist innen in der kardanischen Aufhängung befestigt. Dann ist es einfach den Oberschenkel des Nutzers daran ohne zu großen Abstand zu befestigen. Der Exo-Oberschenkel 86 hat dann in der Schwungrichtung nach hinten auch automatisch einen Anschlag an dem zweiten Element 82 oder an dem dritten  
15 Element 84, so dass eine Überdrehung verhindert werden kann. Sollte jedoch ein besonders großer Abstand zwischen Nutzer und Exoskelett in dem Bereich der dritten Achse 95 nötig sein, um z.B. eine besonders große Abduktion des Beines zu ermöglichen, kann der Oberschenkel auch außen am dritten Element 84 angebracht werden.

20

Die Elemente 82 und 84, welche die Klammern der kardanischen Aufhängung (gimbal) sind, sind bevorzugt so ausgelegt, dass das innere Element kleiner ist als das äußere Element, und zwar in der Art, dass das innere Element bei extremen Winkeln und Außendrehung des Fußes 90 nicht dem äußeren Element kollidiert und  
25 so den Bewegungsfreiraum eingrenzt. Die Elemente 82, 84 sind bevorzugt als „Klammern“ ausgelegt, können jedoch auch kreisbogenförmig ausgelegt werden, so dass sie mehr den Elementen einer typischen kardanischen Aufhängung ähneln.

In den Figuren 18 - 23 ist ein weiteres Exoskelett 1003 gemäß einem dritten  
30 Ausführungsbeispiels abgebildet. Dieses hat folgende Winkel:

$$\varphi_1 = 35^\circ, \varphi_2 = 70^\circ, \alpha = 20^\circ, \beta = 20^\circ.$$

Dabei zeigen Fig. 18 und 19 das Exoskelett 1003 in neutraler Haltung.

- 42 -

Fig. 20 und 21 zeigen das Exoskelett 1003 mit maximaler Innendrehung von 33 Grad und maximaler Außendrehung von ca. 37 Grad. Dazu wird darauf hingewiesen, dass die Exo-Rückenplatte 82 unten kürzer sein kann als hier gezeigt. Fig. 22 und 23 zeigen das Exoskelett 1003 mit maximaler simultaner Außendrehung von ca. 26 Grad.

Durch das angehobene zweite Element 82 ermöglicht das Exoskelett 1003 dieses Ausführungsbeispiels im Prinzip weitere Schritte als bei den vorigen Ausführungsbeispielen. Diese weiteren Schritte werden jedoch üblicherweise nicht mehr durch den natürlichen Arbeitsraum der meisten Menschen abgedeckt. Der geschaffene Platz hinten an den Beinen des Nutzers erlaubt jedoch auch an den Oberschenkeln des Nutzers weitere Einrichtungen, wie taktile Elemente oder Panzerung anzubringen. Für mobile Anwendungen ist dieser Aufbau interessant, da Sitzen noch weiter erleichtert wird und das Risiko mit der Umwelt zu kollidieren reduziert wird. Auch erlaubt der Aufbau z.B. tieferes Knien ohne dass die Füße 90 des Exoskeletts mit den Hüftelementen kollidieren.

Die bisher beschriebenen Ausführungsbeispiele sind bevorzugt. Dennoch gibt es eine Vielzahl von weiteren Ausgestaltungen, die sich auf alle bisher beschriebenen Ausführungsbeispiele beziehen. Auf einige solche Weiterbildungen wird im Folgenden kurz eingegangen.

Bei den bisherigen Ausführungsbeispielen sind die Elemente 82 und 84 derart gestaltet, dass zwischen der ersten Achse 93 und der dritten Achse 95 nur eine weitere Achse vorgesehen ist, nämlich die zweite Achse 94, die sich aufgrund des Gelenks 83 zwischen den Elementen 82 und 84 ergibt. Es ist auch möglich, nicht nur eine zweite Achse 94 zwischen beibehaltenen Achsen 93 und 95 zu verwenden, sondern unter Verwendung von mehr als 2 Klammern oder Bögen zusätzliche Achsen (z.B. Achsen 94a, 94b, usw.) einzuführen. Besonders wenn sich alle oder einige dieser Elemente ganz ineinander falten lassen, hat dies den Vorteil, dass der Unterschied zwischen maximaler Innendrehung und maximaler Außendrehung des zugehörigen Fußes 90 vergrößert werden kann. Dadurch lassen sich größere Winkelbereiche der Innen- und Außendrehung des Fußes 90 abdecken.

- Die Fig. 24 - 26 zeigen verschiedene Perspektiven eines solchen Beispiels, bei dem das Element 82 unterteilt ist in drei Teile, die hier als 82a, 82b und 82c bezeichnet sind. Jeder dieser Teile ist drehbar mit seinem Nachbarteil verbunden, wodurch sich
- 5 die Achsen 94a, 94b und 94 c ergeben. Vorzugweise ist jede Achse aktuiert. Dies kann auch durch Aktuatoren an den nicht gezeigten Elementen 80 oder 86 geschehen. Die kleineren Elemente decken in dem Beispiel einen Winkel von je  $30^\circ$  und das größere einen Winkel von  $60^\circ$  ab. Ein Fuß ließe sich mit diesem Aufbau (mittels der externen oder internen Rotation des Hüftgelenkes) gleichermaßen um
- 10  $60^\circ$  nach innen wie nach außen drehen (für eine Hüftplatte mit  $\alpha=\beta=0^\circ$ ). Es ist möglich die Elemente 81, 82a, 82b, 82c, etc, 84, 86 in beliebiger Reihenfolge innen oder außen aneinander zu befestigen. Außerdem können die Winkel  $\varphi_i$  der Elemente voneinander unterschiedlich sein. Elemente 82-84, welche wie in dem Beispiel gemäß der Fig. 24 - 26 von innen nach außen angeordnet sind, können
- 15 sich nie, unabhängig von den genutzten Winkeln  $\varphi_i$  schneiden. Sollten jedoch zumindest einzelne der Elemente von außen nach innen angeordnet sein, kann ein Sich-Schneiden verhindert werden, wenn das nächste Element (z.B. ist Element 82c das nächste Element von 82b) einen deutlich kleineren Winkel abdeckt, als das vorherige Element. Es ist auch möglich, dass das Element 82a außerhalb von
- 20 folgenden Elementen 82b, usw. liegt aber als erstes an dem Element 80 befestigt ist. Durch einzelne dieser Maßnahmen oder durch deren Kombination kann verhindert werden, dass der Durchmesser des gesamten Hüftgelenkes mit zunehmender Anzahl der Elemente zu sehr wächst.
- 25 Durch die Verwendung von mehr als 3 Achsen für das Hüftgelenk gibt es im Allgemeinen keine eindeutige Zuordnung mehr für die Wahl der angetriebenen Achswinkel (Gelenkwinkel). Es ist jedoch bevorzugt, den Winkel zwischen Achse 93 und Achse 95 tabellarisch oder funktional ein-eindeutig mit einem Vektor der zu aktivierenden Winkel (Gelenkwinkel) der Achsen 94a, 94b, usw. zu korrelieren.
- 30 Dadurch wird ein sicheres und vorhersagbares Verhalten des Mechanismus erzielt. Im Allgemeinen ist es nötig, dass das Element 84 nicht zu weit aus der Horizontalen abweicht. Dadurch würde das freie Schwingen des Beins behindert. In Fig. 26 sieht man, wie die interne Rotation des Hüftgelenkes durch eine Akkordeon-artige

Entfaltung der Elemente 82a, 82b, 82c vergrößert wird. Diese Art der Aktuation kann auch in die andere Richtung betrieben werden, um eine externe Rotation der Hüfte zu vergrößern. Dabei kann es jedoch vorkommen, dass die Hüftelemente des linken und des rechten Beines leicht miteinander in Konflikt geraten.

5

Es ist im Allgemeinen wichtig, dass das letzte Element (hier 84), an dem der Exo-Oberschenkel 86 befestigt wird, in allen Zuständen des Hüftgelenkmechanismus erlaubt, den Exo-Oberschenkel 86 während des Ganges schwingen zu lassen. Da in den bevorzugten Ausführungsbeispielen der Exo-Oberschenkel 86 innen an dem  
10 dritten Element 84 befestigt ist, ist vorzugsweise der Bereich der dritten Achse 95 des Elementes 84 an der Innenseite eben ausgeführt. Dies entspricht den hier benutzten Darstellungen. Dennoch kann Element 84 rund sein, insbesondere dann, wenn der Exo-Oberschenkel 86 außen befestigt werden sollte, oder wenn der Abstand zwischen Exo-Oberschenkel 86 und Element 84, entlang der dritten Achse  
15 95 so groß sein sollte, dass ein freier Schwung des Exo-Oberschenkels 86 nicht erheblich eingeschränkt werden sollte.

Durch eine besonders breite Wahl der Hüftelemente, bevorzugt als Segmente von Kugelschalen, kann der Hüftmechanismus noch stärker einem faltbaren Teil einer  
20 Kugelschale entsprechen. Dies kann z.B. als Schutz oder Panzerung genutzt werden.

Bei den gezeigten Ausführungsformen des Exoskeletts 1000, 1001, 1002, 1003 ist das dritte Element 84 derart ausgebildet, dass die beiden Schenkel 84, 84b nahezu  
25 senkrecht zueinander angeordnet sind. Das führt dazu, dass das dritte Element 84 bei den verschiedenen Bewegungen seitlich recht weit hinausragt. Damit das dritte Element 84 weniger lateralen Platz einnimmt, ist es möglich, den ersten Schenkel 84a zu verkürzen und zwar bevorzugterweise derart, dass der zweite Schenkel 84b in Neutralhaltung parallel zur Sagittalachse verläuft. Das erleichtert das Schwingen  
30 der Arme beim Gehen und spart Gewicht. Dazu ist es vorgesehen, den Winkel zwischen den Schenkeln 84a und 84b entsprechend anzupassen.

In den beschriebenen Beispielen sind aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht explizit die notwendigen Lager, Achsbefestigungen und Aktuatoren angegeben. Aktuatoren können in oder an jedem Element angebracht sein. Entsprechend werden dann feste Achsverbindungen oder z.B. kuggelagerte Verbindungen  
5 notwendig. So wie das erste Ausführungsbeispiel dargestellt ist, wird jedoch bevorzugt, dass ein Aktuator in einem Exo-Unterschenkel 88 die fünfte Achse 97 zum Exo-Fuß 90 aktuiert. Ein erster Aktuator im Exo-Oberschenkelement 86 aktuiert die vierte Achse 96 des Kniegelenks, ein zweiter Aktuator im Exo-Oberschenkel 86 aktuiert die dritte Achse 95 des Exo-Hüftgelenks, ein Aktuator im  
10 Element 84 aktuiert die zweite Achse 94 des Hüftgelenks, und ein Aktuator an, in, oder auf der Exo-Hüfte bzw. Exo-Rückenplatte 80a aktuiert die erste Achse 93.

Unten sind neuartige Aktuatoren beschrieben welche genutzt werden können um alle Gelenke des beschriebenen Exoskeletts in der bevorzugten Ausführung  
15 anzutreibenden. Unabhängig davon lässt sich der Mechanismus des Exoskeletts jedoch auch durch andere Aktuatoren antreiben. Dies umfasst normale Getriebemotoren, Linearaktuatoren, hydraulische oder pneumatische Zylinder, Direktantrieb durch getriebelose Torquemotoren, Antrieb durch Kabel und Bowdenzüge und Rollen und anderes. Besonders vorteilhaft ist der Antrieb über  
20 Motoren mit rückfahrbaren kuggelagerte Schneckengetriebe (ball worm, ball worm gear, recirculating ball worm drive laut US 3468179 A), mit globalen Rollspindeln oder „harmonic drive“-Getrieben.

Besonders der Exo-Fuß 90 kann im Allgemeinen noch über eine weitere Achse und  
25 nötige Bauteile verfügen mit welcher Pronation und Supination aktuiert werden. Eine besonders vorteilhafte Weiterbildung des Exo-Fußes ist weiter unten beschrieben und wird dort als Exo-Fuß 9000 bezeichnet.

Es kann vorteilhaft sein, wenn die beiden Achsen des Exo-Oberschenkels 86 nicht  
30 parallel zueinander verlaufen. Die vierte Achse 96 muss jedoch immer parallel oder fast parallel zur Achse des Kniegelenkes verlaufen. Die dritte Achse 95 kann jedoch im Allgemeinen beliebig orientiert sein. Dadurch kann, entsprechend zum Effekt des

Winkel  $\alpha$ , beeinflusst werden, wie weit jeweils die externe und interne Rotation des Beins ermöglicht wird.

Der beschriebene Hüftmechanismus, mit wenigstens 3 Achsen, welche sich im  
5 Zentrum des Hüftgelenks schneiden, ist praktisch recht tolerant bzgl. Abweichungen  
in der Achsrichtung. Auch kann der Nutzer größer, kleiner, zu weit vorne, oder zu  
weit hinten, zu weit links, oder zu weit rechts von der idealen Position sein. Dies  
kann genutzt werden, um ein Exoskelett einer Größe für mehr als einen Nutzer zu  
verwenden. Auch wird die Einstellung der Achsabstände und Winkel an einen  
10 speziellen Nutzer erleichtert. Das Prinzip des Mechanismus geht durch diese  
Abweichungen jedoch nicht verloren. Es ist vorgesehen, Befestigungspunkte und  
Lager von Achsen verschiebbar und einstellbar zu konstruieren. Es ist vorteilhaft,  
den Abstand vom Rücken des Nutzers zur Hüftplatte, und auch seine vertikale  
Position einstellen zu können, um so das Zentrum seines Hüftgelenks mit dem  
15 Schnittpunkt der Achsen auszurichten.

Aufgrund der weitgehend anthropomorphen Beschaffenheit des Exoskeletts ist es  
möglich, die beschriebenen Elemente zum großen Teil so zu gestalten, dass sie den  
Nutzer umfassen, und nicht nur, wie in den Abbildungen, seitlich zu ihm stehen.

20

Es ist anzumerken dass, überraschender Weise, bei dem bevorzugten einfachen  
Hüftmechanismus (z.B. Fig.1-25), auch im Zusammenhang mit dem beschriebenen  
Exoskelett, im allgemeinen nur äußerst geringe Drehmomente nötig sind, um die  
zweite Achse 94 zu aktivieren. Das trifft auch dann zu, wenn das Exoskelett, wie in  
25 teleoperativen Anwendungen, das gesamte Gewicht des Nutzers tragen muss,  
während es selbst, an Hüfte oder Rücken, von einem Bewegungssimulator getragen  
wird. Sollte z.B. das Gewicht des Nutzers nur auf einem gestreckten Bein ruhen,  
und dort, ganz mittels seines Fußes auf das Fußelement des Exoskeletts auf ein  
Exo-Bein übertragen werden, befindet sich in Ruhe der Schwerpunkt des Beins und  
30 des Nutzers immer lotrecht unter oder über seinem belasteten Hüftgelenk (Punkt  
91). Ist  $\beta=0^\circ$ , und kann das Gewicht der Elemente 82 und 94 gegenüber den  
anderen Gewichten vernachlässigt werden, können alleinige Änderungen der  
Gelenkwinkel der Achsen 93 und 94 die potentielle Energie ändern indem sie den



- Schwerpunkt anheben. Dazu sind erhebliche Drehmomente nötig. Die Aktuation der Achse 94 ist jedoch auch möglich ohne die potentielle Energie zu ändern, wenn die Achsen 93 und 95 so mitbewegt werden, dass eine alleinige Außendrehung oder Innendrehung (externe oder interne Rotation des Hüftgelenkes) des Fußes erzielt wird. Der Schwerpunkt bleibt dabei auf der gleichen Höhe und somit wird keine Arbeit verrichtet und es treten keine axialen Drehmomente auf. Da sich, durch den geänderten Gelenkwinkel der Achse 93, jedoch die Position der Elemente 82 und 84 in einem Schwerfeld im Allgemeinen ändert, muss dazu ein geringes axiales Drehmoment durch den Aktuator aufgebracht oder aufgenommen werden. Die transversalen Drehmomente auf diese Achse sind jedoch im Allgemeinen sehr groß, sobald ein Bein mit erheblichen Teilen des Körpergewichts belastet wird. Die Gelenke müssen entsprechend stark ausgelegt sein. Auch müssen Reibungskräfte in den Lagern überwunden werden, welche gering sind. Die externe oder interne Rotation des Beines ist beim Menschen kräftemäßig nur schwach ausgeprägt. Daher sind auch die zu aktuiierenden Drehmomente der Achse 94, welche hauptsächlich diesen Freiheitsgrad bedient, im Vergleich zu anderen auftretenden Drehmomenten in den Exo-Beinen gering. Entsprechend können Aktuatoren dort kleiner und schwächer ausfallen.
- Analog sind auch die axialen Drehmomente eines Aufbaus mit mehreren Elementen 82, 82b, etc (Fig. 24-26) nur gering. Die recht kleinen Aktuatoren können daher für alle Aufbauten, leicht an oder in diesen Elementen lokalisiert sein, aber auch entfernt (Bowdenzüge). Dies trifft auch zu, wenn nur ein Element 82 verwendet wird. Auch wenn  $\beta$  ungleich  $0^\circ$  sein sollte, sind diese axialen Drehmoment gering, sofern  $\beta$  klein bleibt.

- Alle beschriebenen Aufbauten und Kombinationen von Eigenschaften können außer für Exoskelette auch für humanoide Roboter und auch virtuelle Avatare oder virtuelle Maschinen angewendet werden. In den virtuellen Fällen müssen reale Bauteile durch entsprechende virtuelle ersetzt werden.

Wie bereits erwähnt, wurde bei der bisherigen Beschreibung der bevorzugten Exoskelette 1001, 1002, 1003 auf die Darstellung und Beschreibung zugehöriger

- 48 -

Aktuatoren verzichtet. Besonders geeignete Aktuatoren werden im Folgenden beschrieben.

5 In Fig. 27 - 31 ist ein erstes Ausführungsbeispiel eines neuartigen Aktuators 2001 dargestellt.

Fig. 27 zeigt in perspektivischer Darstellung den Aktuator 2001 von vorne geschlossen, also innerhalb seines Gehäuses.

10 Fig. 28 zeigt den Aktuator 2001 in ähnlicher Perspektive wie zuvor. Hier sind jedoch Teile des Gehäuses entfernt, nämlich eine vordere Basisplatte 106a und eine Basisumfassung 107.

Fig. 29 zeigt den Aktuator 2001 in ähnlicher Darstellung wie zuvor. Hier fehlen eine vordere Kette 110 sowie Elemente 108, 109, 104a und 105a, die ihren Antrieb betreffen.

15 Fig. 30 zeigt den Aktuator 2001 in perspektivischer Darstellung von der Rückseite und zwar ohne Gehäuseteile.

Fig. 31 zeigt den Aktuator 2001 in Seitenansicht mit Blick auf die Vorderseite ohne die vordere Basisplatte 106a.

20 Der Aktuator 2001 verfügt über zwei parallel laufende Ketten 110, 113, welche auf einer Seite des Aktuators 2001 in einer Ebene mit einer Kugelumlaufspindel 114 und im gleichen Abstand zu ihr verlaufen. Der Aktuator 2001 ist in „Integralbauweise“ ausgelegt, was bedeutet, dass den Gehäuseteilen 106a, 106b und 107 Funktionen der Basis, also tragende Funktionen zukommen. Teile dieser  
25 Funktion werden hier jedoch auch von einer Linearführungsunterstützung 121 und von dem Rahmen 123 eines Motors 124 übernommen, welche kraftschlüssig mit der Basis verbunden sind. Eine Nuss 117 ist mit einem Verbindungblock 118 kraftschlüssig verbunden, welcher mittels geeigneter Mittel mit den Ketten 110, 113 kraftschlüssig verbunden wird. Dieser Aktuator 2001 verfügt über einen dedizierten  
30 angetriebenen Schaft 101, einen dedizierten Umlenkschaft 102 und einen dedizierten festen Schaft 103. Angetriebene Zahnräder 108, 111 sind durch geeignete Weise, wie direkt (schweißen, schrauben) oder indirekt (Nabe, Spannsatz, Speichennabe) kraftschlüssig mit einer angetriebenen Achse 101

- verbunden. Die Achse 101 und die Zahnräder 108 und 111 können auch als ein gemeinsames Bauteil gefertigt werden. Der angetriebene Schaft 101 wird durch geeignete Lager 104a, 104b mit der Basis so verbunden, dass er sich um seine Achse drehen, aber nicht verschieben kann. Der dedizierte Umlenkschaft 102 ist
- 5 hier ebenso gelagert, mittels der Lager 105a, 105b. Bevorzugt sind die freilaufenden Kettenräder 109, 112 kraftschlüssig mit dem Umlenkschaft 102 verbunden. Die Lagerung kann jedoch auch anders, wie einzeln oder gemeinsam auf einer intern und nicht wie hier extern gelagerten Achse erfolgen. Es ist auch möglich auf den dedizierten festen Schaft 103 zu verzichten (er dient dazu, andere
- 10 Aktuatoren am Beispielaktuator zu befestigen), und andere Befestigungen zur Verfügung zu stellen. Auch ist es möglich den festen Schaft zu nutzen, um die Lager der freilaufenden Achse bzw. freilaufenden Kettenräder zu tragen (wie z.B. in dem Aktuator 2003).
- 15 In Aktuator 2001 kann auf die Kettenräder und die Ketten auf einer Seite verzichtet werden. Dann können jedoch, abhängig von der gegebenen Last, erhebliche transversale Drehmomente auftreten, welche von Nuss und Linearführung übernommen werden können müssen. Basiselemente, Achsen, Lager, etc. sollten dann natürlich der neuen Geometrie geeignet angepasst werden, da Platz und
- 20 Gewicht gespart werden kann.

- In Fig. 32 ist in Seitenansicht ein Aktuator 2002 zu einem zweiten Ausführungsbeispiel dargestellt. Dieser Aktuator 2002 entspricht dem zuvor beschriebenen Aktuator 2001 fast völlig. Die angetriebene Achse ist hier jedoch
- 25 kürzer ausgelegt und die angetriebene Komponente X eines Exoskeletts bzw. Roboters ist mit geeigneten Mitteln platzsparend im Inneren des Gehäuses an der angetriebenen Achse befestigt. Das Gehäuse ist entsprechend modifiziert. Variationen wie bei dem Aktuator 2001 sind natürlich auch hier anwendbar.
- 30 Ein dritter Aktuator 2003 nach einem weiteren Ausführungsbeispiel ist in den Fig. 33 - 37 dargestellt.
- Fig. 33 zeigt Aktuator 2003 komplett in perspektivischer Ansicht, jedoch ohne optionales Gehäuse

- 50 -

Fig. 34 zeigt den Aktuator 2003 von oben, wobei eine Linearführungsunterstützung 121b besonders gekennzeichnet ist, die mit der Basis kombiniert ist und die in Fig. 35 als Seitenansicht separat dargestellt ist.

Fig. 36 zeigt eine Seitenansicht auf den Aktuator 2003 ohne die vorderen Teile 108,  
5 109, 110

Fig. 37 zeigt eine perspektivische Sicht auf den Aktuator 2003, jedoch ohne die vorderen Teilen 108, 109, 110 und ohne die Lager 104c und 125a.

Der Aktuator 2003 ist in "differentieller" Bauweise ausgelegt. Er benötigt also nicht  
10 zwingend ein Gehäuse. Ein geeignetes Gehäuse kann jedoch mit einer Linearführungsunterstützung 121b, die kombiniert ist mit der Basis, verbunden werden und so auch die Belastbarkeit erhöhen. Die mit der Basis kombinierte Linearführungsunterstützung 121b ist nun, im Vergleich zu der zuvor dargestellten Linearführungsunterstützung 121 so ausgeführt, dass auch Lager und Achsen daran  
15 befestigt werden können. Der Aktuator 2003 verfügt über ein zentrales Lager 104c, welches den angetriebenen Schaft trägt und nur den axialen Freiheitsgrad zulässt. Der feste Schaft 103 ist hier fest mit der Linearführungsunterstützung 121b verbunden. Die freilaufenden Kettenblätter sind auf ihm geeignet gelagert befestigt. Dieser Aktuator 2003 kann natürlich auch so ausgeführt werden, dass ein  
20 dedizierter Umlenkschaft und ein dedizierter fester Schaft, wie bei Aktuator 2001 verwendet werden. Alle Schäfte wären dann mit 121b geeignet, gelagert oder fest, verbunden. Auch der Aktuator 2003 kann, wie auch der Aktuator 2001, in einer einseitigen Variante, ähnlich zu Fig. 36 (ohne freies, ungenutztes Lager und Detailanpassungen) gebaut werden. Alle hier gezeigten Aktuatoren können in  
25 integraler oder differentieller Bauweise gefertigt werden.

Ein vierter Aktuator 2004 nach einem weiteren Ausführungsbeispiel ist in den Fig. 38 - 41 dargestellt.

Fig. 38 zeigt eine perspektivische Sicht auf den Aktuator 2004.

30 Fig. 39 zeigt eine Seitenansicht auf den Aktuator 2004 ohne die vordere Basisplatte 106a.

Fig. 40 zeigt eine Draufsicht auf den Aktuator 2004 ohne die Basisumfassung 107.

Fig. 41 zeigt eine Draufsicht auf einen Aktuator 2004' ohne Basisumfassung 107. Dabei stellt Aktuator 2004' eine Abwandlung zu Aktuator 2004 dar mit nur einer Linearführung.

- 5 Der Aktuator 2004 demonstriert eine platzsparende Bauweise mit nur einer Kette, die mit 113 markiert ist. Die zwei Linearführungen 119 werden mit geeigneten Mitteln direkt oder indirekt an der Kette 113 befestigt. Sie sind hier über der Kette 113 angebracht. Die doppelte Auslegung verdoppelt die Belastbarkeit ohne die Länge zu beeinflussen. Durch die Lage können die Linearschienen 119 deutlich
- 10 länger als der gerade Streckenabschnitt sein, und daher längere Wagen, oder doppelte in größerem Abstand voneinander verwendet werden. All dies erhöht die Belastbarkeit mit Drehmomenten. Die kugelgelagerte Mutter 117 der Kugelumlaufspindel 114 muss zwar erhebliche Drehmomente aufnehmen, da sie aber fest durch geeignete Mittel fest mit den Lagern der Linearführung verbunden
- 15 ist, wirken sich diese Momente nur wenig auf den Betrieb aus. In einer Abwandlung 2004' kann auch dieser Aktuator mit nur einer Linearführung 109 betrieben werden (Fig. 41), wenn die damit verbundenen Einschränkungen in Kauf genommen werden. Nuss, Linearführungswägen oder -wagen und Verbindungsblock können auch als eine Komponente gefertigt werden. Die Lager der Kugelumlaufspindel sind
- 20 mit geeigneten Mitteln direkt oder indirekt mit der Basis verbunden, in der Abbildung mit der Basisumfassung 108.

Ein fünfter Aktuator 2005 nach einem weiteren Ausführungsbeispiel ist in den Fig. 42 und 43 dargestellt.

- 25 Fig. 42 ist eine perspektivische Darstellung auf Aktuator 2005 und Fig. 43 stellt eine Seitenansicht dar.

- Der Aktuator 2005 entspricht dem Aktuator 2004' mit nur einer Linearführung (s. Fig. 41). Die Kette 113 ist direkt oder indirekt an den Linearführungswagen befestigt.
- 30 Hier wird die Linearführung bevorzugt so in eine Ebene mit der Kette 113 und der Kugelumlaufspindel verschoben, dass die Drehmomente entlang einer transversalen Achse praktisch Null werden. Dieser Fall wird in Fig. 42 aus zeichnerischen Gründen, nicht ganz realisiert, da die Mitte der Kugelumlaufspindel

der Linearschiene nicht in der Ebene der Kettenmitte und der Achse der Kugelumlaufspindel Ebene liegt. Dazu müsste der Abstandshalter 126, welcher fest mit der Basis und der Linearschiene verbunden wird oder Teil davon sein kann, etwas dicker gewählt werden. Wie zu sehen, kann die Basis/das Gehäuse teilweise noch schmaler ausgelegt werden. Natürlich ist auch hier wieder eine differentielle Bauweise gewählt werden. Auch die Wahl von ausschließlich dedizierten Achsen oder nicht dedizierten Achsen steht einem frei. Linearschiene und Kugelumlaufspindel können hier den Platz tauschen (wie bei dem anschließend beschriebenen Aktuator 2006). Dann ist die Kette 113 direkt oder indirekt an der Nuss der Kugelumlaufspindel befestigt. In einem solchen Aufbau sind die Effekte der Drehmomente auf die Nuss und Linearführung jedoch größer.

Ein sechster Aktuator 2006 nach einem weiteren Ausführungsbeispiel ist in Fig. 44 bis 46 dargestellt.

Fig. 44 ist eine perspektivische Darstellung auf Aktuator 2006 und Fig. 45 stellt eine Seitenansicht dar. In Fig. 46 ist außerdem ein Aktuator 2006' mit nur einer Führungsschiene 119 dargestellt.

Bei dem Aktuator 2006 bzw. 2006' laufen eine oder zwei Linearführungen 119 etwa parallel zur Kugelumlaufspindel 114, welche zum Verringern von Drehmomenten nahe an der Kette geführt wird. Alle Teile werden entsprechend der andern Beispiele geeignet mit der Basis und Achsen verbunden.

Ein siebter Aktuator 2007 nach einem weiteren Ausführungsbeispiel ist in Fig. 47 bis 49 dargestellt.

Fig. 47 ist eine perspektivische Darstellung auf Aktuator 2007 und Fig. 48 stellt eine Seitenansicht dar. In Fig. 49 ist außerdem ein Aktuator 2007' mit nur einer Führungsschiene 119 dargestellt.

Bei dem Aktuator 2007 bzw. 2007' laufen eine oder zwei Linearführungen 119 unterhalb der Kugelumlaufspindel 114, welche zum Verringern von Drehmomenten nahe an der Kette 113 geführt wird. Alle Teile werden entsprechend der andern

- 53 -

Beispiele geeignet mit der Basis und Achsen verbunden. Gegenüber Aktuator 2006 kann so Platz gespart werden.

All die genannten Aktuatoren können mit bekannten Mitteln, insbesondere bekannte  
5 Federelemente und deren Kopplung zu Seilen, Stangen, Achsen etc., zu seriellen elastischen Aktuatoren konvertiert werden. Ein Beispiel dafür ist ein Aktuator 2008, wie in den Fig. 50 - 52 symbolisch angedeutet. Hier sind nicht gezeigte Elemente entsprechend der vorherigen Beispiele zu ergänzen. Ausschlaggebend ist, dass bevorzugt coaxial zu einem Streckenabschnitt der Kette 113 Federelemente 127  
10 angebracht sind. Die coaxiale Befestigung erübrigt oder vereinfacht die Führung der Federn 127 sehr, da kaum transversale Kräfte auftreten. Die zwei Federn 127 sind hier auf je einer ihrer Seiten mit einem Verbindungsblock verbunden, der Widerlager aufweist und hier mit 118b bezeichnet ist. Auf der anderen Seite können sie entweder direkt mit der Kette 113 verbunden sein, oder aber wie in Fig. 50 - 52  
15 dargestellt, mit einem Ketten-Feder-Verbindungselement 128. Dieses ist mit der Kette 113 verbunden. Als Federn können auch Scheibenfedern, Blattfedern, Elastomere, cushion drives, etc. verwendet werden. Die Verwendung dieser Elemente reduziert auch negative Einflüsse durch den Polygoneffekt. Die Kette 113 kann auch wie bisher an Nuss oder Linearwagen etc. befestigt werden und die Federn Teil der  
20 Kette sein. Ein entsprechender Federmechanismus kann auch coaxial zur Kugelumlaufspindel als Teil des Verbindungsblocks ausgelegt sein. Dies ist besonders einfach zu implementieren, wenn die Kugelumlaufspindel ausschließlich axial belastet wird, da dann auf weitere *starke* Führungen der Federn verzichtet werden kann. Wie bekannt kann die Feder auch eine Torsionsfeder des  
25 angetriebenen Schaftes oder einer dort befestigten Nabe (welche wiederum die angetriebenen Zahnräder hält) sein. Die angetriebene Achse kann auch an einer Torsionsfeder befestigt sein, an welcher das angetriebene nächste Element des Roboters befestigt wird. Ebenso kann die Torsionsfeder Teil dieses nächsten Elementes des Roboters sein. In Fig. 51, 52 ist ein Element 128 mit der Kette  
30 verbunden und die Federn mit zwei Seiten von Element 118b. Die Kette 113 muss hier durch 118b geführt werden. Der Aufbau kann auch umgekehrt erfolgen, wo 128 Teil von 128b wird, und die Federaufnahmen von 118b mit der Kette und je einer

- 54 -

Feder verbunden werden, oder die Federn direkt in die Kette integriert sind und die Kette zwischen den Federn angetrieben wird.

Es ist im Allgemeinen vorteilhaft am Exo-Oberschenkel 86 (oder am Oberschenkel  
5 eines humanoiden Roboters) nicht nur den Antrieb bzw. Aktuator für die dritte Achse  
95, sondern auch für die vierte Achse 96 (Kniegelenk) anzubringen. Diese beiden  
Aktuatoren können zwar übereinander gestapelt angebracht werden. Es ist jedoch  
vorzuziehen, dass sie sich die Achsen für angetriebene Räder und Umlenkrollen  
teilen. Eine angetriebene Achse hält dann die Lager für die Umlenkrollen der jeweils  
10 anderen Achse. In Fig. 53, 54 ist ein Beispiel für einen geeigneten Aktuator 2009  
dargestellt, bei dem auch Lager 129 für ein freilaufendes Kettenrad sowie Lager 130  
für Achsen eingezeichnet sind. Es sei darauf hingewiesen, dass das Prinzip von  
Aktuator 2009 auf alle anderen hier dargestellten und implizierten Aktuatoren  
übertragen werden kann. Bevorzugt wird zwischen den Lagern der Umlenkrollen  
15 und den Achsen noch ein Drehmomentsensor, wie eine geeignete Sensornarbe,  
angebracht. Dadurch können Restmomente der sich gegenüber der Achse  
drehenden Umlenkrollen gemessen werden und genutzt werden, um gemessen  
Hauptmomente dieser Achse zu korrigieren. Bevorzugt werden die freilaufenden  
Kettenräder auch nicht wie abgebildet einzeln gelagert, sondern z.B. zunächst an  
20 einer gemeinsamen Achse befestigt, welche dann gegenüber der dazu coaxialen  
angetriebenen Achse gelagert werden. Ebenso ist es möglich in der angetriebenen  
Achse, z.B. durch Dehnungsmessstreifen, an verschiedenen Stellen darauf  
wirkende axiale Drehmomente zu messen und so einzelne Einflüsse auf die Achse  
zu trennen. Es ist natürlich auch möglich Aktuatoren mit mehreren Basen  
25 differentiellen oder integralen Designs in einem Gehäuse zu integrieren.

Eine weitere Ausgestaltung des Aktuators sieht vor, dass die angetriebene Achse  
einen Bowdenzugmechanismus antreibt. Dazu werden z.B. geeignete Rollen  
bevorzugt direkt an dieser Achse befestigt, oder aber das Seil direkt um die Achse  
30 gewunden. Die Achse oder die Rollen können über geeignete Kabelführungen/-rillen  
verfügen. Es können mehrere Seile, jeweils für die gleiche oder entgegengesetzte  
Zugrichtung, genutzt werden. Das Seil oder die Seile können mit bekannten Mitteln  
an Achse oder Rolle verankert werden um die Kraftübertragung sicher zu stellen.



- 55 -

- Mittels Bowdenzügen können die Seile so verlegt werden, dass an entfernten Stellen eine oder mehrere weitere Rollen oder Achsen angetrieben werden. Auch hier können wieder bekannte Mittel genutzt werden, wie z.B. gefedert befestigte Bowdenzüge oder gefederte Rollen, um die Eigenschaften eines gewöhnlichen
- 5 seriellen elastischen Aktuators zu erzielen. Die Rollendurchmesser des Bowdenzugmechanismus können nun genutzt werden, um das Übersetzungsverhältnis mit bekannten Mitteln weiter zu beeinflussen. Es besteht auch die Möglichkeit die Leistung über Seile, aber ohne Bowdenzüge, sondern nur über Rollen und entsprechende Mittel, zu übertragen.
- 10 Entsprechend dem Bowdenzugmechanismus können auch zwei „hydraulic-rotary-transducer“ (HRT) genutzt werden. Der eine HRT am Aktuator wird durch die angetriebene Achse rotatorisch angetrieben und erzeugt dabei Druck und Unterdruck in den zwei angeschlossenen Druckleitungen. Am entfernten HRT
- 15 bewirkt dies eine entsprechende Bewegung des aktuierten Gelenks. Dies hat gegenüber Bowdenzügen den Vorteil, dass weniger Verluste auftreten und das System weniger flexibel reagiert.
- Die freilaufenden Kettenräder, Rollen, Walzen, etc. sind hier stets so dargestellt,
- 20 dass sie den gleichen Durchmesser wie die angetriebenen Kettenräder, Rollen, Walzen, etc. haben. Sie können jedoch unterschiedliche Durchmesser haben. Außerdem können mehrere kleine frei laufende Umlenkrollen genutzt werden. Dadurch kann z.B. der verfügbar Stellweg erhöht werden, der Pfad der Kette, des Seils, etc. im Gehäuse so beeinflusst werden, um Platz für weitere Achsen oder
- 25 Vorrichtungen, wie Leistungselektronik, zu schaffen. Die frei laufenden Rollen (etc.) können auch durch alternative Umlenkelemente, wie Gleitschienen, Bowdenzüge, Teflonführungen, Kanäle in der Basis, etc. ersetzt werden.
- In der Regel sind geeignete Spannvorrichtungen nötig, um Ketten, Seile, Riemen,
- 30 etc. vorzuspannen. Diese können bevorzugt auf der der Kugelumlaufspindel gegenüberliegenden Seite des Aktuators angebracht werden oder aber in die Halterung der Achsen integriert sein um den Abstand der Achsen leicht zu verändern. Diese Mittel können Federelemente enthalten.

Ein Vorteil aller beschriebenen Aktuatoren ist, dass sie über ein konstantes Übersetzungsverhältnis von Motor zu angetriebener Achse verfügen. Besonders bei Gelenken, welche über einen großen Winkelbereich aktuiert werden müssen, kann dies vorteilhaft sein. Dadurch lassen sich Roboter und Exoskelette bauen, welche beweglicher sind als bisher. Auch beeinflusst die Lage des Aktuators im Exoskelett oder Roboter nicht mehr direkt die zuvor winkelabhängigen Übersetzungsverhältnisse. Somit wird der Designprozess vereinfacht.

Ein weiterer Vorteil der genannten Ausführungsbeispiele ist, dass nun fast die gesamte Länge eines Aktuators als nutzbarer Verfahrbereich der Kugelumlaufspindel zur Verfügung steht. Dies erlaubt bei gleichbleibenden Durchmessern der Rollen der angetriebenen Achse größere Stellwinkelbereiche. Umgekehrt können aber auch größere Rollendurchmesser und dadurch größere Kraftübersetzungen erreicht werden. Dadurch kann die Anzahl der Aktuatoren und/oder Motoren in Robotern und Exoskeletten gesenkt werden, und/oder die Stärke oder Leistung erhöht werden.

Ein weiterer Vorteil der genannten Ausführungsbeispiele ist, dass die Kette stets nahe der geführten Nuss montiert ist. Dadurch werden Schwingungen und unkontrolliertes elastisches Verhalten reduziert. Die Aktuation erfolgt außerdem in beiden Richtungen völlig gleichartig; und zeigen nicht in einer Richtung ein stabiles Zugverhalten und in der anderen ein instabiles Schubverhalten. Dadurch werden die kontrollierbaren Kräfte und Geschwindigkeiten erhöht.

Es ist möglich, die Kugelumlaufspindel und den bürstenlosen DC Motor durch einen Linearmotor (wie einen linearen, elektrischen, bürstenlosen Motor oder Piezoaktuatoren) zu ersetzen. Die hohe Reaktionszeit dieses Antriebs kann von Vorteil sein. Auch ist es möglich mehrere Linearmotoren zu stapeln und sie gemeinsam eine Kette, Seile etc. antreiben zu lassen und dadurch das verfügbare Volumen zu nutzen um große Kräfte und Leistungen zu ermöglichen.

- 57 -

Es ist auch möglich elektrische oder mechanische Bremsen in die Aktuatoren zu integrieren. Dies geschieht bevorzugt direkt am Motor. Da dortige geringe Bremsmomente große Bremsmomente an der angetriebenen Achse zur Folge haben.

- 5 Alle Aktuatoren können mit naheliegenden Mitteln mit Positionsenncoder, Winkelencodern, Drehmomentsensoren und Endschaltern versehen werden. Kabel werden bevorzugt von einem Aktuator in den nächsten durch die Schäfte geführt. Dazu können Öffnungen in den Schäften vorgesehen sein um Kabel ein- und auszuführen. Alle Aktuatoren können, wie gesagt mit Ketten, Seilen, Riemen, und  
10 geeigneten Umlenk- und Spannvorrichtungen realisiert werden.

Die Aktuatoren können auch für andere robotische Systeme, oder beliebige andere Anwendungen genutzt werden, welche eine hohe Drehmomentübersetzung benötigen.

- Um größere Kräfte zu erreichen können auch zwei Kugelumlaufspindeln genutzt  
15 werden, welche jeweils über die beschriebenen Mittel verfügen um eine gemeinsame Kette anzubringen. Die Spindeln befinden sich dann auf gegenüberliegenden Seiten der Kettenräder (z.B. gespiegelt an der Ebene der Achse der angetriebenen Achse und der freien Achse) und treiben jeweils einen anderen geraden Abschnitt der Kette an. Die Nüsse treiben dann die Kette in der  
20 gleichen Umlaufrichtung, aber im Raum in entgegengesetzter Richtung an. Wenn mehrere gerade Abschnitte der Kette, bei Verwendung von mehreren Umlaufrädern oder angetriebenen Rädern vorliegen, können auch mehr als 2 Spindeln, Motoren, etc. verwendet werden. Ebenso können mehrere Spindeln parallele Mechanismen antreiben, welche jeweils eine gemeinsame Antriebsachse antreiben. Dies  
25 entspricht etwa der Darstellung in Fig. 53, 54, bloß dass es nur eine angetriebene Achse gäbe, welche von allen Ketten, Motoren und Spindeln etc. angetrieben würde. Die Lagerung müsste an diese Situation angepasst werden.

- Um unbegrenzte Stellbereiche zu erreichen kann vorgesehen sein, das z.B. bei einem System mit 2 Kugelumlaufspindeln, welche eine gemeinsame Kette  
30 antreiben, jeweils nur eine Spindel mit geeigneten Mitteln in die Kette eingreifen muss um Arbeit zu leisten. Die andere Spindel kann dann die verbundene Nuss und

- 58 -

Kettengreifmechanismus zurückfahren, in die Kette eingreifen lassen, und beginnen Arbeit zu leisten oder Kraft auszuüben. Dann kann der andere Greifmechanismus entsprechend sich von der Kette lösen, in seine neue Startposition fahren, die Kette greifen und beginnen an der Kette Arbeit zu leisten, oder Kraft auszuüben. Dieses

5 Vorgehen entspricht in etwa dem Drehen eines Steuerrades mit zwei Händen, bei dem jeweils nur eine Hand nötig ist, um Kontrolle über das Steuerrad zu behalten. Die Drehmomente, Kräfte, Geschwindigkeiten und/oder Positionen auf die Kette müssen besonders beim Ein- und Ausgreifen genauestens geregelt werden, damit keine Unstetigkeiten auftreten. Ähnliche Mechanismen können wieder mit Seilen

10 oder Riemen realisiert werden. Die Konstruktion von geeigneten Aktuatoren und Greifprofilen zum Greifen und Halten der Ketten etc. liegen nahe (z.B. Seilklemmen, Seilbahnen), Zangen mit beidseitigen Zahnprofilen. Es können auch mehrere Kugelumlaufspindel parallel (ähnlich Fig. 53, 54, jedoch mit nur einer angetriebenen Achse) genutzt werden um eine gemeinsam Achse anzutreiben.

15 Jedoch können auch hier die Aufbauten so gestaltet sein, dass sie in die Ketten, etc., ein und ausgreifen können und dadurch beliebige axiale Stellwege der angetriebenen Achse erreicht werden. Ebenso können die Kettenblätter, Achsen, Naben, etc. mit Kupplungsmechanismen versehen sein. Dann können die Ketten mit den Nüssen/Kugelumlaufspindeln verbunden bleiben und die Kettenblätter oder

20 Achsen können entkoppelt und zurückgefahren werden bevor sie wieder in Antriebsrichtung betrieben werden und zum Leisten von Arbeit oder Erzeugen von Kräften eingekuppelt werden. Das Prinzip des Ein- und Ausgreifens von Antrieben mehrerer Umlaufspindeln, kann auch auf Aktuatorbeispiele mit nur einseitiger Kettenbelastung angewendet werden. Dann ist ein solcher Aktuator, mit zwei

25 angetrieben Kettenrädern und zwei Kugelumlaufspindeln, nicht oder nicht wesentlich größer als ein Aktuator mit beidseitiger Kettenbelastung. Hier ist es dann auch möglich, nur eine Kette (oder Aufbau gepaster Ketten) zu verwenden, welche jeweils von je einer Seite von einer Nuss und Kugelumlaufspindel angetrieben wird. Hier muss verhindert werden, dass die Greifmechanismen kollidieren, wenn einer

30 entkoppelt und zurückgefahren wird.

Exoskelette für die Teleoperation, also zur Kontrolle von Statthaltern in einer virtuellen (Avatare) oder realen Umgebung (humanoide Roboter), benutzen

- 59 -

Bewegungssimulatoren um statische oder zeitlich veränderliche Körperbeschleunigungen auf den Nutzer auszuüben. Dazu werden auch kardanische Aufhängungen eingesetzt.

- 5 Anhand der folgenden Abbildungen werden bevorzugte Bewegungssimulatoren beschrieben, die zusammen mit einem Exoskelett verwendet werden können.

- Fig. 55 zeigt in perspektivischer Darstellung einen Bewegungssimulator 3000, an dem ein Exoskelett 203 mit Rückenhalterung befestigt ist. Der Bewegungssimulator
- 10 3000 besteht im Wesentlichen aus zwei Hauptteilen, nämlich
- einer Translationseinheit 210 mit den Aktuatoren 250, 252, 254 sowie geeigneten Antriebsmitteln, wie Motoren, Wellen, Seilen, usw., die hier nicht dargestellt sind. Dadurch werden translatorische Bewegungen entlang der Pfeile P1, P2 und P3 ermöglicht.
  - 15 - einer Rotationseinheit 211 mit einem ersten Rotationselement 200, einem zweiten Rotationselement 201 sowie einem dritten Rotationselement 202. Diese sind jeweils drehbar gegenüber benachbarten Elementen gelagert.

Im Folgenden wird hauptsächlich die Rotationseinheit 211 beschrieben.

- 20 Fig. 56 ist ebenfalls eine perspektivische Darstellung des Bewegungssimulators 3000 und dient im Folgenden zur Beschreibung verschiedener Rotationsachsen.

- Das erste Rotationselement 200 ist mit seinem ersten Ende an dem Linearaktor 254 drehbar um eine erste Rotationsachse 205 gelagert, die bei Normalbetrieb im
- 25 Wesentlichen senkrecht verläuft und der Hochachse des Linearaktors 254 entspricht. Am zweiten Ende des ersten Rotationselements 200 ist das zweite Rotationselement 201 drehbar um eine zweite Rotationsachse 206 gelagert. An dem anderen Ende dieses zweiten Rotationselements 201 ist das dritte Rotationselement 202 um eine dritte Rotationsachse 207 gelagert. An dem anderen
- 30 Ende des dritten Rotationselements 202 ist das Exoskelett 203 drehbar um eine vierte Rotationsachse 208 gelagert. Es sei darauf hingewiesen, dass für die Realisierung der genannten Drehachsen jeweils ein entsprechendes Lager

- 60 -

vorzusehen und auch anzuordnen ist. Dies ist dem Fachmann allgemein bekannt, so dass darauf nicht weiter eingegangen wird.

5 Aus Fig. 57 ist erkennbar, dass sich die Rotationsachsen 205, 206, 207, 208 in einem Punkt 220 schneiden und welche Winkel zwischen den einzelnen Elementen bzw. Achsen gebildet werden, nämlich:

- die Rotationsachsen 205 und 206 bilden einen Elementwinkel 212
- die Rotationsachsen 206 und 207 bilden einen Elementwinkel 213
- die Rotationsachsen 207 und 208 bilden einen Elementwinkel 214.

10

Die Summe der Elementwinkel muss größer als  $180^\circ$  sein, um eine kardanische Blockade (engl.: gimbal lock) zu vermeiden und um zu erlauben, dass der Nutzer im Exoskelett, alle möglichen räumlichen Orientierungen einnehmen kann.

15 In den Figuren sind die Rotationselemente 200, 201, 202 jeweils nur mit 2 Achslager bzw. Achsbefestigungspunkten ausgestattet (und nicht je Achse mit zwei Gegenüberliegenden auf beiden Seiten des Nutzers). Besonders das erste Rotationselement 200 und das zweite Rotationselement 201, gezählt von der Befestigung an der Translationseinheit 210, können jedoch auch über 2  
20 Achsbefestigungspunkte oder Achslager verfügen, wenn sie spiegelsymmetrisch ergänzt werden sollten. Es ist jedoch vorteilhaft das zweite Rotationselement 201 nicht so zu ergänzen und es stattdessen stets so zu orientieren, dass die Beine des Exoskeletts vorzugsweise von ihm weg orientiert sind. Das zweite Rotationselement 201 ist oval geführt, um Gewicht und Platz zu sparen. Dadurch wird jedoch das  
25 nächste Rotationselement 202 in seiner Größe so beschränkt, dass es nicht mehr als Voll- oder Halbkreis ausgelegt werden kann, da sonst der Nutzer unweigerlich damit kollidieren muss.

Erfindungsgemäß ist das dritte Rotationselement 202 als einfacher, kurzer und  
30 kleiner Bogen oder Klammer ausgelegt, verfügt also nur über zwei Befestigungspunkte für Achsen und Achslager. Um ein möglichst weiches Verhalten der Bewegung in Bereichen zu erzielen, in welche die Rotationseinheit 211 mit nur 3

- 61 -

Achsen einen gimbal lock erfahren würde, wird der Winkel von dem dritten Rotationselement 202 möglichst groß gewählt.

Im Allgemeinen kann sich das Exoskelett 203 dann nicht mehr um  $360^\circ$  um die  
5 Achse 208 drehen ohne mit dem dritten Rotationselement 202 zu kollidieren oder  
dann zu kollidieren, wenn der Nutzer bestimmte Körperhaltungen einnimmt. Diese  
Kollisionen müssen und können jedoch verhindert werden. Es ist im Allgemeinen  
nämlich nicht nötig, dass die Achse 208 um  $360^\circ$  aktuiert werden muss. (Bei  
kleineren Elementwinkeln 213 ist Aktuation um  $360^\circ$  jedoch möglich. Dann treten  
10 jedoch wieder zunehmend die genannten Probleme mit hohen Geschwindigkeiten  
und Beschleunigungen auf.)

Wie in Fig. 58 zu sehen, ist das dritte Rotationselement 202 bevorzugt so am  
Exoskelett 203 angebracht, dass es insgesamt recht weit oben sitzt, und der Teil,  
15 welcher an dem zweiten Rotationselement 201 befestigt wird, relativ zum  
Befestigungspunkt am Exoskelett (in Neutralhaltung der Rotationseinheit, wie in den  
Figuren gezeigt) unten sitzt. Andere Befestigungsarten sind jedoch möglich. In den  
Figuren ist auch zu sehen, dass das dritte Rotationselement 202 vorzugsweise in  
einem Winkel zum Exoskelett 203 angebracht ist. Dies wird durch eine  
20 Rückenhalterung 204 erreicht, welche ganz analog zur Achse 93 des zweiten  
Elements 82 der Hüfte (Fig. 2), durch zwei Winkel beschrieben werden kann.  
Wichtig ist, dass die Elementachse 208 durch den gemeinsamen Schnittpunkt aller  
Elementachsen 205, 206, 207, 208 verläuft. Dieser liegt vorzugsweise im Körper des  
Nutzers, z.B. in seinem Kopf, oder in seinem Torso. Vorzugsweise wird ein  
25 Startwinkel für das dritte Rotationselement 202 in der Grundhaltung gewählt und  
dann eine geeignete Rückenhalterung 204 entworfen. Diese Halterung 204 bildet  
dann mit der Rückenplatte (oder Hüftplatte, etc.) des Exosketts 203 eine starre  
Einheit. Element 202 ist im Beispielaufbau um  $30^\circ$  aus der Vertikalen geneigt.  
Dieser Winkel kann auch anders sein, sofern Element 202 nicht mit der  
30 Rückenplatte oder anderen Teilen des Exosketts 203 kollidiert. Der aktuierte  
Winkel der Achse 208 muss dann auf einen Bereich eingeschränkt werden, der so  
klein oder kleiner ist, dass das dritte Rotationselement 202 nie mit der Rückenplatte  
kollidieren kann. Es reicht gewöhnlich aus, diesen Bereich deutlich kleiner als das

- 62 -

Maximum zu wählen sofern die effektiv verbleibende Summe der Gelenkwinkel  $180^\circ$  übersteigt. Alle anderen Achsen 205, 206 und 207 können über volle  $360^\circ$  aktuiert werden.

- 5 Im bevorzugten Ausführungsbeispiel haben die Elementwinkel folgende Werte:  
Winkel 212 =  $90^\circ$ ; Winkel 213 =  $90^\circ$ ; Winkel 214 =  $30^\circ$  (s. Fig. 57).

- Die Ansteuerung erfolgt mit Methoden der inversen Kinematik mit Randbedingungen. Achse 208 wird dazu vorzugsweise so gesteuert, dass sie im
- 10 bevorzugten Ausführungsbeispiel nie mehr als  $\pm 35^\circ$  bzgl. der Rückenplatte des Exoskeletts ausgelenkt ist (In den Abbildungen sind dies  $30^\circ$ . Dieser Winkel dient dazu den Mechanismus tendenziell so zu steuern, dass der Nutzer mit seinen Armen vom zweiten Rotationselement 201 ferngehalten wird). Dazu können weiche oder harte Restraints oder Potentiale verwendet werden. Die Methode der
- 15 Ansteuerung ist z.B. die, dass zunächst eine Sollorientierung, z.B. die Raumlage eines Avatars, oder ein entsprechender Sollwert aus einem Motion-Cueing Prozess, genommen wird. Im Computer, in einer dynamischen Simulation eines Modelles des Bewegungssimulators oder Teilen davon, wird die vorgegebene Sollposition/Solllage des Nutzers im Exoskelett als Randbedingung oder Restraint
- 20 auf das Exoskelett oder Endeffektor des Bewegungssimulators angewendet. Dann reagiert der simulierte Bewegungssimulator so, dass „automatisch“ die richtigen Gelenkwinkel eingenommen werden, um die geforderte Orientierung einzunehmen. Diese Gelenkwinkel können dann als Sollwinkel für den realen Bewegungssimulator genutzt werden. Dieses Vorgehen lässt sich natürlich auch mathematisch
- 25 vereinfachen und beschleunigen, indem präzise mathematische Modelle verwendet werden, und nicht numerische Simulationen.

- Ein Vorteil dieses Aufbaus ist, dass das dritte Rotationselement 202 sehr nah am Exoskelett sitzen kann. Dadurch wird es klein, steif und leicht und liegt nahe dem
- 30 Rotationszentrum. Es lässt sich daher leicht und schnell aktuiert. Es kann über einen sehr großen Elementwinkel verfügen, welcher weiter außen ein deutlich größeres und schwereres Element benötigen würde. Durch die Aktuierung der Achse 208 in einem kleineren Winkelbereich als  $360^\circ$  können Kollisionen verhindert



- 63 -

werden. Zuvor hat die Notwendigkeit der Vermeidung von Kollisionen die Verwendung größerer Elemente motiviert. Trotz des begrenzten Winkelbereichs der Achse 208 deckt der Mechanismus den Raum aller Rotationen so gut ab, dass flüssige Bewegungen mit nur geringen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen aller Rotationselement 205 - 208 ermöglicht werden. Ein gimbal lock wird vermieden und das System verhält sich stets „gutmütig“.

Die Verwendung des beschriebenen leichten Elements nahe dem Nutzer hat noch weitere Vorteile bzgl. der Schnelligkeit der kardanischnen Aufhängung. Durch die Verwendung von 4 Achsen und 3 Elementen, oder mehr, gibt es für jede oder fast jede Orientierung des Nutzers im Raum, unendlich viele, dicht beieinander liegende, Aktuationswinkel der kardanischnen Aufhängung um diese Orientierung des Nutzers zu erzeugen. Sollte schnell eine neue Raumlage/Orientierung des Nutzers eingenommen werden, müssen in der Regel alle Elemente der Rotationseinheit schnell reagieren. Das ist jedoch insbesondere bei den äußeren Elementen schwierig, weil sie zum einen selber in der Regel groß und schwer sind und über große Trägheitsmomente verfügen, andererseits wirkt auf sie auch noch der ganze innere Aufbau des Bewegungssimulators. Wenn bei der beschriebenen kinematischen Steuerung der Rotationseinheit auch die Trägheit (approximiert oder präzise) der einzelnen Elemente berücksichtigt wird, ergibt sich, dass auch bei schnellen Orientierungsänderungen und selbst plötzlicher Umkehr der Winkelgeschwindigkeiten, weiches Beschleunigungsverhalten für die größeren Elemente auftritt. Sie können gewissermaßen langsam auslaufen und ihre Drehgeschwindigkeit langsam verringern, bevor sie sie umkehren. Schnelle oder plötzliche Änderungen treten fast ausschließlich bei dem innersten oder zweitinnersten Aktuator auf. Diese sind klein und können schnell reagieren. Dadurch wird es möglich größere, steifere äußere Elemente der Rotationseinheit mit ggf. auch schwächeren Motoren zu wählen ohne die Reaktion des Systems zu verlangsamen. Alternativ können schnellere Bewegungen ausgeführt werden.

Um diesen Vorteil weiter auszubauen, können am inneren Element 202 weitere, kleine Elemente angebracht werden, ganz analog wie dieses Element 202 am Exoskelett befestigt ist. Auch diese zusätzlichen Elemente werden im Allgemeinen, besonders für die gewünschten großen Elementwinkel, nur über Winkelbereiche

- 64 -

kleiner als  $360^\circ$  aktuiert. Dadurch können noch schnellere Reaktionen der inneren Elemente dazu führen, dass die äußeren Elemente langsamer etc. reagieren dürfen und entsprechend ausgelegt werden können.

Alternativ ist es möglich nur eine kardanische Aufhängung mit 4 Achsen aus 3  
5 Elementen, oder mehr, so zu gestalten, dass einzelne Elementwinkel beliebig sein können, jedoch die Summe über  $180^\circ$  liegt, jedoch bevorzugt unter  $270^\circ$ . Dadurch kann der resultierende Mechanismus einen gimbal lock vermeiden. Die  
Elementwinkel sind dann im Allgemeinen kleiner als  $90^\circ$ , der Wahl bisheriger  
Bewegungssimulatoren. Je geringer die Winkelsumme, desto schneller müssen die  
10 Gelenke aktuiert und beschleunigt werden, doch die Konstruktion wird leichter und weniger träge. Wenn nur ein begrenzter Orientierungsraum benötigt wird, kann die Winkelsumme kleiner als  $180^\circ$  sein.

Auch mit nur 2 Elementen und 3 Achsen der kardanischen Aufhängung ist es  
möglich einen gimbal lock zu vermeiden und dennoch fast jede Orientierung im  
15 Raum einnehmen zu können, ohne dass große Geschwindigkeiten bei der Aktuation der Elemente auftreten müssen. Dazu muss zunächst die Summe der  
Elementwinkel größer als  $180^\circ$  sein. Wenn beide Elementwinkel gleich sind, ergibt sich nur noch eine Position, mit zusammen gefalteten Elementen, wo die Achsen  
parallel stehen, und Freiheitsgrade verloren gehen. Je größer die Winkelsumme,  
20 desto gutmütiger das Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverhalten im Orientierungsraum. Es können noch alle Achsen in einer Ebene liegen, es gibt jedoch alternative Gelenkwinkel, welche die gleiche Raumlage/Orientierung des  
Nutzers beschreiben, und wo die Achsen nicht in einer Ebene liegen. Dieser Aufbau spart Aktuatoren, Gewicht und Kosten gegenüber Aufbauten mit 4 Achsen.

25 Die Achsbefestigungen der hier gezeigten Elemente sind sehr kurz und flach. Die können jedoch auch lang sein und somit z.B. Zylindern ähneln und somit Abstände zwischen den Elementen untereinander oder von einem Element zum Exoskelett zu überbrücken.

Die beschriebenen Arten einer kardanischen Aufhängung kann auch für beliebige  
30 andere Anwendungen Verwendung finden.

- 65 -

Die bisher beschriebenen Exoskelette können weiterhin verbessert werden durch eine besondere Ausgestaltung der Füße 90. Exoskelette - und auch humanoide Roboter - benötigen üblicherweise zwei Freiheitsgrade des Fußes um der Beweglichkeit des Menschen nahe zu kommen. Das erfordert entsprechenden Aufwand bei der Aktuierung, wodurch wiederum entsprechender Platz und Gewicht benötigt werden.

Fig. 60 zeigt ein bevorzugtes Ausführungsbeispiel für einen erfindungsgemäßen Exo-Fuß 9000. Dieser Fuß 9000 verfügt über eine Achse 910, welche in etwa parallel zur Querachse des Fußgelenks des Nutzers liegt. Parallel zu dieser Achse verläuft bevorzugt ein Schaft 902, um den Fuß an einem Aktuator zu befestigen. Alternativ ist dieser Schaft 902 Teil des Aktuators. Supination und Pronation des Fußes können also nicht aktuiert werden. Um Bewegung ähnlicher Art doch zu ermöglichen, wenn auch nicht aktuiert, wird die Sohle 904 des Fußes 9000 seitlich abgerundet, wie in Fig. 61 gezeigt.

Dies geschieht bevorzugt ausgehend von einem Profil von zwei Kreissegmenten mit unterschiedlichen Radien von Kreisen oder kreis-ähnlichen Formen, welche Ihre Mittelpunkte in der Nähe des Sprunggelenks des Nutzers haben und parallel zur Frontalebene des Nutzers liegen (Fig. 63). Kleinere Kreisdurchmesser erleichtern ein Abrollen, größere erlauben einen sichereren Stand. Es ist vorzuziehen, die Pronation zu erleichtern, also auf der Innenseite des Fußes 9000 kleinere Radien zu wählen. Das Profil wird entlang der Fußlänge nach vorne, parallel zur Sagitalachse, gestrichen um die Oberfläche der Sohle im mittleren Bereich des Fußes 9000 zu definieren (Fig. 62, 63). Um den Fersenbereich des Exo-Fußes 9000 zu definieren wird das Profil nach hinten um die Achse des Fußgelenks gedreht. Im mittleren Teil des Fußes 9000, etwa vom Sprunggelenk vorwärts bis zum ersten Zehengelenk, bildet die Oberfläche der Sohle 904 dann links und rechts jeweils das Oberflächensegment eines Zylinders oder einer zylinder-ähnlichen Geometrie. Im hinteren Teil des Fußes 9000, etwa vom Sprunggelenk nach hinten, ähnelt die Sohlenoberfläche links und rechts jeweils einem Oberflächensegment einer Kugel oder eines Torus oder dergleichen.

- 66 -

Der vordere Teil des Exo-Fußes 9000 hat am Übergang vom mittleren Teil des Fußes den gleichen Querschnitt wie der mittlere Teil. Der vordere Teil kann flach sein ist aber bevorzugt nach oben angewinkelt um ein Abrollen zu erlauben. Der Übergang vom mittleren zum vorderen Teil kann auch genau so wie der Übergang vom mittleren zum hinteren Teil erfolgen, indem das Oberflächenprofil um eine

5 Querachse rotiert/gestrichen wird. Der Abstand der Querachse zur Sohle 904 ist für den vorderen Teil bevorzugt deutlich größer als der Abstand von der Sohle 904 zum Sprunggelenk. Bevorzugt liegt diese Achse in der Nähe des Unterschenkels um ein leichtes Abrollen zu erzielen.

10

Der Vorteil des gegebenen Fußes 9000 ist, dass nun der Fuß 9000 des Exoskeletts (auch Roboters oder virtuellen Avatars oder virtueller Maschine) wie ein rollendes Lager wirkt. Wenn ein Schritt getätigt wird, und der Fuß 9000 mit dem abgerundeten Fersenbereich den Boden berührt, rollt der Fuß 9000 auf der Fersenoberfläche ab,

15 bis der mittlere Fußbereich den Boden berührt. Bis zu diesem Zeitpunkt wird der Abstand von Fußgelenk zu Boden praktisch konstant gehalten, sofern der Fuß 9000 nicht gleichzeitig stark von links nach rechts rollen sollte. Auch dann wäre die Änderung des Abstandes langsam und graduell. Dieser praktisch konstante Abstand beim Abrollen heißt auch, dass durch das Abrollen des Fußes 9000 eine feste Basis

20 geschaffen wird, das Sprunggelenk, welche Ihre Höhe nicht ändert, und daher keine Arbeit auf den oberen Teil des Körpers leistet, wenn der Nutzer mit konstanter Geschwindigkeit geht (Ansonsten wirken Brems- oder Beschleunigungskräfte in oder entgegen der Bewegungsrichtung). Das Abrollen wird deshalb als sehr flüssig und weich empfunden, und zwar selbst dann, wenn die Sohle 904 des Fußes 9000

25 tatsächlich aus hartem Material gefertigt wird.

30

Wenn der vordere Fußteil ebenso geformt wird wie der hintere, jedoch mit einem größeren Radius bei Abrollen nach vorne als bei der Ferse, tritt der selbe Effekt auf und der Fuß leistet keine Arbeit auf große Teile des Körpers. Die natürliche

Bewegung des Knies und des Fußgelenks verlangt jedoch hier nach einem größeren Radius. Es kann auch eine Position des Fußgelenks fest gewählt werden, bei der der Mittelpunkt dieses Radius im Kniegelenk liegt. Dies erlaubt extrem weiches Abrollen selbst ohne bewegliches Fußgelenk.

Durch den tangentialen Übergang der Radien des Profils wird ein Rollen nach links und rechts zu jedem Zeitpunkt erlaubt.

Der mittlere Teil des Fußes 9000 ist von der Seite gesehen gerade. Dies erlaubt ein  
5 stabiles Stehen und der Nutzer hat einen weiten Bereich, über den er seinen  
Schwerpunkt verlagern kann ohne instabil zu werden. Dieser flache Bereich kann  
durch Verschiebung der Rotationsachsen des Profils nach vorne und hinten  
verkleinert oder vergrößert werden um die Wendigkeit zu beeinflussen. Ebenso  
kann der Übergang zum vorderen Bereich des Fußes 9000 nach vorne und hinten  
10 verschoben werden.

Seitlich gibt es bei dem gezeigten Exo-Fuß 9000 keinen solchen geraden Bereich.  
Er kann jedoch hinzugefügt werden. Dann liegen die Mittelpunkte der  
Kreissegmente in Fig. 63 nicht übereinander, sondern wären nach links und rechts  
15 versetzt. Unten hätte die Sohle dann einen geraden Abschnitt, welcher bevorzugt  
tangential in die Kreissegmente übergeht.

Ganz an den Außenkanten des Fußes 9000 werden bevorzugterweise  
Abrundungen mit kleinen Radien verwendet, um extreme Körperhaltungen zu  
20 ermöglichen und Verletzungen vorzubeugen. Die Sohle 904 wird bevorzugterweise  
mit Gummi etc. bespannt und/oder daraus hergestellt. Dies verbessert zum einen  
die Bodenhaftung und Stoßdämpfung beim Gehen. Besonders das seitliche  
Abrollen wird durch ein elastisches, dämpfendes Material auch gehemmt, was bei  
einem Querprofil ohne geraden Abschnitt hilfreich sein kann, um den Aufwand zum  
25 Halten des Gleichgewichts beim Stehen auf einen Fuß zu reduzieren.  
Es ist möglich diese Art des Fußes in Exoskeletten, humanoiden Robotern,  
virtuellen Avataren oder virtuellen Maschinen zu nutzen.

Als Bewegungsplattformen für Exoskelette in teleoperativen Anwendungen (virtuell  
30 oder realer Statthalter) sind auch Stewart-Plattformen geeignet, die auch als  
Hexapod bezeichnet werden. Stewart-Plattformen verfügen im Allgemeinen über  
sechs Linearaktuatoren oder ähnliche Mittel, welche auf einer Seite am Boden oder

einer anderen Basis befestigt sind, und auf der anderen Seite an einer Arbeitsplattform oder Arbeitsebene.

In Fig. 64 und 65 ist ein Ausführungsbeispiel 4000 einer erfindungsgemäßen  
5 Stewart-Plattform dargestellt. Fig. 64 zeigt eine perspektivische Sicht und Fig. 5 zeigt eine Sicht von vorne auf die Stewart-Plattform 4000.

Die Stewart-Plattform 4000 weist einen festen Rahmen 303 auf, der auch als Basis  
bezeichnet wird. Daran ist über eine Vielzahl von Aktuatoren 304a - 304f, die  
10 bevorzugterweise als Linearaktuatoren ausgestaltet sind, ein beweglicher Rahmen 302 installiert. An diesem ist mittels eines Befestigungselements 301 ein Exoskelett 300 befestigt.

Bei der Stewart-Plattform 4000 wird die Arbeitsplattform durch den beweglichen  
15 Rahmen 302 gestaltet. Mittels des Befestigungselements 301 wird das Exoskelett 300 etwa so im Rahmen 302 positioniert, dass der Nutzer etwa zwischen den Befestigungspunkten der Aktuatoren 304a-304f am Rahmen zentriert ist. Die Aktuatoren 304a-304f werden am beweglichen Rahmen 302 und an der festen Basis 303 oder dem Boden oder Bodenstützen befestigt. Dabei wird die für  
20 Stewart-Plattformen übliche Grundanordnung mit zueinander versetzten Befestigungspunkten, wie in Fig. 64, 65 zu sehen, angewendet. Um ein Schwingen der Beine und Arme nach vorne zu vereinfachen, ohne mit Komponenten des Aufbaus zu kollidieren, ist es vorteilhaft das Exoskelett 300 etwas nach hinten zu verlagern. Auch ist es vorteilhaft, wenn der Rahmen 302, bei aufrechtem Nutzer,  
25 etwas nach hinten geneigt ist, da der Nutzer allgemein dazu tendiert, nie ganz aufrecht zu gehen, und so die maximalen Kippwinkel nach vorne vergrößert werden. Die bewegliche Plattform ist erfindungsgemäß mit langen Stützen 305a, 305b und 305c ausgestattet. Diese Stützen 305a, 305b, 305c sind essentiell, um den Arbeitsraum des Bewegungssimulators zu maximieren. Die heben den Rahmen,  
30 relativ zum Nutzer, an und verringern so Möglichkeiten, dass der Nutzer mit dem Rahmen kollidiert. Auch erlauben sie, dass die Arbeitsplattform, bzw. die Stützen selbst, sehr tief zwischen die Aktuatoren sinken kann und dennoch weiterhin gekippt, geschwenkt, und linear beschleunigt werden kann, ohne mit den Aktuatoren

304a-304f zu kollidieren. Dies wird noch weiter dadurch erleichtert, dass der Abstand der Aktuatoren 304a-304f an der Basis 303 so groß im Vergleich zu ihrer minimalen Länge gewählt wird, dass die Aktuatoren 304a-304f auch dann, wenn die obigen und die unteren Befestigungspunkte praktisch in einer Ebenen parallel zum Boden liegen, noch nicht ganz eingefahren sind. Dadurch kann auch bei einer tiefen Lage der Arbeitsplattform, noch Translation und Rotation aktuiert werden.

Um den rotatorischen Arbeitsraum des Bewegungssimulators noch zu vergrößern, ist erfindungsgemäß vorgesehen, dass das Exoskelett 300 auch über zusätzliche Rotationsaktuatoren relativ zur Arbeitsplattform 302 rotiert werden kann. So kann z.B. das Befestigungselement 301 so ausgelegt sein, dass es um seine Längsachse oder seine Querachsen oder eine Kombination davon drehbar ist. Auch kann direkt am Exoskelett 300 eine Rotationseinheit vorgesehen sein. Allgemein kann auch eine kardanische Aufhängung oder ein serieller Roboterarm mit der beweglichen Plattform verbunden werden.

Es ist insbesondere vorteilhaft, das erste, bevorzugt kreisrunde Element einer kardanischen Aufhängung als Rahmen 302 zu wählen. Dann können weitere Elemente dieser Aufhängung bevorzugt im Inneren dieses ersten Elementes befestigt werden. Dann können die Aktuatoren der Stewart-Plattform 4000 so angetrieben werden, dass sie Rotationen und/oder Translationen, oder auch z.B. nur Translationen erzeugen. Im letzten Fall wird die Stewart-Plattform als reine Translationseinheit eingesetzt, während die kardanische Aufhängung als reine Rotationseinheit wirkt. Für letztere können wieder die zuvor beschriebenen erfinderischen Merkmale übernommen werden. Eine Stewart-Plattform als Translationseinheit hat den Vorteil sehr steif und stark zu sein, da es sich hier um einen parallelen Mechanismus handelt. Die Stewart-Plattform kann jedoch auch zusätzlich oder ergänzend zur gehaltenen kardanischen Aufhängung Rotationen erzeugen. Rotationseinheiten an der beweglichen Plattform 302 können beliebige Achsanordnungen haben.

Es kann vorteilhaft sein, die bewegliche Plattform als Rahmen auszulegen, welcher die Querverbindungen zwischen den Befestigungspunkten sehr hoch ansetzt. Dies

- 70 -

kann z.B. einer Halbkugel in Strebenkonstruktion, oder einem Gewölbe ähneln, jedoch mit langen Stützen 305 zu den Befestigungspunkten mit den Aktuatoren 304 ähneln. Die Querstreben können auch, zwischen den Befestigungspunkten schräg nach oben geführt werden, und so nicht mehr, wie in den Abbildungen, in einer Ebene liegen.

Die Basis 303 ist in den Fig. 64, 65 als Rahmen gegeben. Dieser Rahmen kann jedoch auch entfallen, und die Aktuatoren können am Boden befestigt werden. Auch können die Befestigungspunkte auf Säulen stehen. Dann kann die Plattform sehr tief gehalten werden, ohne das der Nutzer Gefahr läuft mit dem Boden zu kollidieren. Dann wird der Arbeitsraum des Bewegungssimulators vergrößert, der Platzbedarf jedoch erhöht.

Nötige Gelenke zur Befestigung der Aktuatoren an der Plattform und der Basis fehlen in den Fig. 64, 65 und werden bevorzugt als Kardanwellen (U-joints) ausgelegt.

Das Befestigungselement 301 ist in den Abbildungen nur angedeutet. Es liegt zwar bevorzugt hinter dem Exoskelett 300, kann jedoch deutlich stärker als in den Abbildungen ausgelegt sein. Insbesondere kann es an mehreren Punkten, verstrebt, mit der Arbeitsplattform verbunden sein, oder auch selbst Teil der Plattform sein.

Es wird vorgezogen, teleskopische Linearaktuatoren mit mehr als 2 coaxialen Elementen (in Abbildungen ein festes und ein bewegliches Element = 2 Elemente) zu verwenden. Diese haben einen größeren Unterschied zwischen maximaler und minimaler Länge. Daher erlauben sie einen deutlich größeren Arbeitsbereich. Es können z.B. teleskopische Kugelumlaufspindeln oder hydraulische Zylinder eingesetzt werden. Besonders, wenn die Arbeitsplattform tief liegt oder steil angewinkelt wird, ergeben sich hier deutliche Vorteile.

Es kann sinnvoll sein, am Rücken des Exoskeletts 300, oder an anderen Punkten des Mechanismus, die gehaltene Gewichtskraft und/oder andere Kräfte und oder



- 71 -

Drehmomente zu erfassen. Dadurch kann die Steuerung des Exoskeletts 300 in teleoperativen Anwendungen erleichtert werden.

- Vorteile des beschriebenen Bewegungssimulators liegen darin, den Nutzer so, etwa  
5 in seiner Mitte, zu halten, dass ein vergrößerter nutzbarer Arbeitsbereich genutzt werden kann. Der Nutzer kann leicht um Punkte in seinem Inneren oder in seiner Nähe gedreht werden, ohne dass besonders große Stellwege der Aktuatoren nötig wären. Durch die Verwendung der Stützen an der beweglichen Arbeitsplattform (oder ähnlichen beweglichen Aufbauten) kann auch mit einfachen linear Aktuatoren  
10 noch bei tiefen oder weit gekippten/rotierten Raumlagen noch immer Translation dargestellt werden. Der Kippbereich, Schwenkbereich, Drehbereich etc. also der Raum möglicher Orientierungen wird erweitert. Diese Bereiche werden durch Verwendung von einer oder mehrerer weiteren Rotationsachsen zur Schwenkung des Exoskeletts 300 erweitert. Wenn die Stewart-Plattform so ausgelegt wird, dass  
15 sie eine kardanische Aufhängung enthält, können beliebige Raumlagen eingenommen werden und klassische Grenzen von Stewart-Plattformen werden aufgehoben. Dann dient die Stewart-Plattform als sehr steife und starke Translationseinheit, kann aber auch noch Rotationen darstellen.
- 20 Die beschriebenen Bewegungssimulatoren, mit Stewart-Plattform oder Translationseinheit und kardanischer Aufhängung, ohne Exoskelett, können auch mit anderen Ein- und Ausgabeeinheiten für Computer kombiniert werden. So kann anstatt des Exoskeletts ein Flugzeug-, Hubschrauber- oder Fahrzeugcockpit befestigt werden, um virtuelle oder reale Fortbewegungsmittel zu steuern und einen  
25 verbesserten Eindruck der auf sie wirkenden Kräfte in Fernbedienungs- oder Simulationsanwendungen zu erlangen.

- Die hier beschriebenen Neuerungen können in vielfältiger Weise miteinander kombiniert werden, um vorteilhafte neue Eigenschaften von Systemen der  
30 Teleoperation, Robotik, Bewegungssimulation und Aktuation zu erlangen.

- 72 -

Es kann jede einzelne der beschriebenen Vorrichtungen oder Verfahren, jede Kombination von Vorrichtungen oder Verfahren oder eine Kombination aller Vorrichtungen oder Verfahren realisiert werden.

- 5 Im Folgenden werden einige vorteilhafte Kombinationen genannt.

Die beschriebenen Fußelemente (Fig. 60-63 und Beschreibung) für humanoide Roboter, virtuelle oder reale Maschinen und Exoskelette entfalten insbesondere mit Exoskeletten, Robotern, oder virtuellen Maschinen ihre vollen Vorteile, welche über  
10 ein Hüftgelenk gemäß Fig. 1-26 und obiger Beschreibung verfügen. Dieses Hüftgelenk erlaubt nämlich bessere Kontrolle der Beine und damit Füße, auch in Grenzsituationen, und kann dadurch maximalen Vorteil aus den zusätzlichen Freiheitsgraden der Fußelemente ziehen.

- 15 Die beschriebenen Exoskelette (auch in Kombination mit den beschriebenen Füßen) lassen sich mit den beschriebenen Bewegungsplattformen und deren Variationen kombinieren. Dadurch wird es möglich Teleoperationen besser durchzuführen.

Sowohl in den Exoskeletten, ferngesteuerten humanoiden Robotern und  
20 Bewegungssimulatoren können die beschriebenen Aktuatoren Anwendung finden, um auf geringem Platz größere Stellwinkelbereiche, größere Drehmomente, geringeren Energieverbrauch, kleineres Gewicht, Rückfahrbarkeit, etc. zu erreichen. Die Exoskelette, ferngesteuerte humanoide Roboter und Bewegungssimulatoren erlangen dadurch Eigenschaften, welche mit anderen Aktuatoren nicht, oder nur  
25 schwer erzielt werden könnten.

Besonders der Hüftaufbau der beschriebenen Exoskelette und humanoiden Roboter profitiert von den beschriebenen Aktuatoren, da besonders die dritte Achse 95 sehr viel Arbeit leisten können muss, und gleichzeitig über einen sehr großen  
30 Stellwinkelbereich verfügen muss, damit der natürliche Arbeitsbereich des Nutzers nicht wesentlich eingeschränkt wird. Ähnliches gilt für die vierte Achse 96 des Knies, wenn auch nicht in gleichem Maße.

- 73 -

Die beschriebenen kardanischen Aufhängungen als Bewegungssimulator, ihre Elemente oder Teile davon lassen sich mit den beschriebenen Exoskeletten, mit verbessertem Hüftgelenk, und der Stewart-Plattform kombinieren. Dies erlaubt es die verbesserte Beweglichkeit und Stärke des Exoskeletts auszunutzen, welche sonst durch begrenzte Bewegungssimulatoren eingeschränkt wäre. So werden z.B. schnelles Springen, Laufen, Rennen, Trampolinsprüngen, etc. zwar durch die beschriebenen Exoskelette ermöglicht, jedoch ist auch ein geeigneter Bewegungssimulator nötig, um dieses Potential voll zu nutzen, welchen die beschriebenen Bewegungssimulatoren darstellen.

10

Entsprechendes gilt für Methoden und Vorrichtungen für die Reduktion oder Erhöhung der empfundenen Schwerkraft. Diese profitieren von den beschriebenen Hüftgelenken, Fußelementen, und Bewegungssimulatoren, alleine oder in jeder Kombination. Die Methoden und Vorrichtungen für die Reduktion oder Erhöhung der empfundenen Schwerkraft erlaubt z.B. die Verwendung von leichteren Exoskeletten, wenn Kräfte reduziert werden. Um die dann möglichen schnelleren Bewegungen und Lageänderungen auch durchführen zu können, werden jedoch schnellere und bessere Bewegungssimulatoren, wie beschrieben, benötigt oder sind zumindest hilfreich. Werden Kräfte erhöht wird es besonders wichtig, dass jeder Freiheitsgrad des Fußes aktuiert ist.

20

Voll aktuierte Hüftgelenke mit 3 effektiven Freiheitsgraden und voll aktuierte Füße, wie beschrieben, erlauben es schwerere Lasten durch frei bewegliche Exoskelette, welche ein Nutzer direkt steuert, tragen zu lassen. Sollten stattdessen entsprechende Roboter teleoperativ bedient werden, von einem entfernten Nutzer in einem Exoskelett an einem Bewegungssimulator, profitiert dieser Nutzer von Möglichkeiten der oben beschriebenen Schwerereduktion, und unter Nutzung des beschriebenen Fußes. Dies trifft auch auf virtuelle Anwendungen zu. Die Verwendung von den beschriebenen Hüften in Exoskelett und Roboter verbessern die Anwendbarkeit weiter.

25

30

Die beschriebenen Stewart-Plattformen lassen sich mit den beschriebenen kardanischen Aufhängungen kombinieren. Die Aktuatoren der Stewart-Plattform

- 74 -

tragen dann direkt oder indirekt eine kardanische Aufhängung. Auch kann das beschriebene innerste Element 202, oder mehrere davon hintereinander, genutzt werden, um ein Exoskelett (ggf. mit einer Halterung wie 204), an der beweglichen Arbeitsplattform einer Stewart-Plattform indirekt oder direkt zu befestigen um den  
5 Rotationsarbeitsraum des Bewegungssimulators zu vergrößern.

Es kann vorgesehen sein, dass ein Exoskelett von der Bewegungsplattform am Rücken schnell gelöst werden kann. Dann kann dieses Exoskelett sofort als mobiles Exoskelett zur Kraftverstärkung oder als humanoider Roboter eingesetzt werden. Es  
10 ist dann vorteilhaft dieses Exoskelett auch mit dem beschriebenen Fuß auszustatten, um leichtes Abrollen und bessere Kontrolle etc. zu erlauben. Dann kann dieses Exoskelett oder Roboter etc. auch über Vorrichtungen zur Schwerkraftreduktion oder Verstärkung verfügen.

15 In der Verwendung als „gehender Rollstuhl“ profitieren Exoskelette von jeder Kombination von Hüftgelenk, dem beschriebenen Fuß, und den Vorrichtungen und Verfahren der Schwerkraftkompensation oder Schwerkrafterhöhung. Sie erlauben gehbehinderten, schwachen, oder gelähmten sich natürlicher zu bewegen, ohne ihr volles Gewicht mit den Beinen tragen zu müssen. Ebenso kann das empfundene  
20 Gewicht graduell gesteigert werden, um Muskelaufbau oder Gewöhnung zu erreichen. Für Astronauten kann auch ein Eindruck von Schwerkraft erreicht werden, welcher sonst nicht vorläge, hier jedoch dazu dienen kann, Muskelabbau zu mindern.

25 Es kann jede einzelne der beschriebenen Neuerungen, einschließlich der oben beschriebenen Kombinationen, jede Kombination von Neuerungen oder eine Kombination aller Neuerungen realisiert werden.

#### **Bezugszeichenliste**

30

- |     |  |
|-----|--|
| 80a | Element 1, erstes Element, Exo-Hüfte oder Exo-Rückenplatte |
| 80b | Achsbefestigungsregion (Befestigungselement) von 80a       |

- 75 -

	81	Schaft der Achse 1
	82	Exo-Hüftgelenk 1, Element 2, zweites Element
	82b	Exo-Hüftgelenk 1b, Element 2b
	82c	Exo-Hüftgelenk 1c, Element 2c
5	83	Schaft der Achse 2
	84	Exo-Hüftgelenk 2, Element 3, drittes Element
	84a, b	Schenkel von 84
	85	Schaft der Achse 3
	86	Element 4, viertes Element, Exo-Oberschenkel
10	87	Schaft der Achse 4
	88	Element 5, fünftes Element, Exo-Unterschenke
	89	Schaft der Achse 5
	90	Element 5, sechstes Element, Exo-Fuß
	91	Mittelpunkt des Hüftgelenks
15	92	Achse parallel zur Sagitalachse durch Mittelpunkt des Hüftgelenks
	93	Achse 1, erste Achse
	94	Achse 2, zweite Achse
	94b	Achse 2b
	94b	Achse 2c
20	95	Achse 3, dritte Achse
	96	Achse 4. vierte Achse
	97	Achse 5, fünfte Achse
	101	angetriebener Schaft / angetriebene Welle
25	102	Umlenkschaft, Losradschaft
	103	fester Schaft / feste Welle
	104a	Lager, vorne, angetriebene Achse
	104b	Lager, hinten, angetriebene Achse
	104c	Lager, zentral, angetriebene Achse
30	105a	Lager, vorne, frei laufende Achse
	105b	Lager, hinten, frei laufende Achse
	106a	vordere Basisplatte
	106b	hintere Basisplatte

- 76 -

	107	Basisumfassung
	108	angetriebenes, vorderes Kettenrad
	109	frei laufendes, vorderes Kettenrad
	110	vordere Kette
5	111	angetriebenes, hinteres Kettenrad
	112	frei laufendes, hinteres Kettenrad
	113	hintere Kette
	114	Kugelumlaufspindel
	115	Lager A der Kugelumlaufspindel
10	116	Lager B der Kugelumlaufspindel
	117	Spindelmutter, Mutter, Nuss
	118	Verbindungsblock
	118b	Verbindungsblock mit Widerlager für Federelement
	119	Linearführungsschiene, Schiene
15	120	Linearführungswagen
	121	Linearführungsunterstützung
	121b	Linearführungsunterstützung kombiniert mit Basis
	122	Schaftkupplung
	123	Motorrahmen
20	124	Motor
	125a	Lager, vorne, für freilaufendes Kettenrad
	125b	Lager, hinten, für freilaufendes Kettenrad
	126	Abstandshalter
	127	Federelement
25	128	Ketten-Feder-Verbindungselement
	129	Lager für freilaufendes Kettenrad
	130	Lager für Achsen
	200	Element A, erstes Rotationselement
30	201	Element B, zweites Rotationselement
	202	Element C, drittes Rotationselement
	203	Exoskelett mit Rückenhalterung
	204	Rückenhalterung

- 77 -

	205	Achse A, erste Rotationsachse
	206	Achse B, zweite Rotationsachse
	207	Achse C, dritte Rotationsachse
	208	Achse D, vierte Rotationsachse
5	210	Translationseinheit
	211	Rotationseinheit
	212	Elementwinkel A
	213	Elementwinkel B
	214	Elementwinkel C
10	220	Schnittpunkt von 205-208
	250	erster Linearaktuator
	252	zweiter Linearaktuator
	254	dritter Linearaktuator
	300	Exoskelett
15	301	Befestigungselement
	302	beweglicher Rahmen / Arbeitsplattform
	303	fester Rahmen / Basis
	304	Aktuatoren
	304a-f	Linearaktuatoren
20	305	Stützen
	305a-c	einzelne Stützen
	902	Schaft
	904	Sohle
25	910	Achse durch 902
	1000-1003	Exoskelett
	2000-2009	Aktuatoren
	3000	Bewegungssimulator
30	4000	Stewart-Plattform
	9000	Exo-Fuß
	X	Angetriebene Komponente

**Patentansprüche**

1. Vorrichtung (1000), die ein erstes Element (80a, 80b), ein zweites Element (82), ein drittes Element (84) und ein viertes Element (86) enthält, wobei
  - 5       - das erste Element (80a, 80b) mit einem ersten Drehgelenk (81) verbunden ist, über das das zweite Element (82) um eine erste Achse (93) drehbar gelagert ist,
  - das zweite Element (82) mit einem zweiten Drehgelenk (83) verbunden ist, über das das dritte Element (84) um eine zweite Achse (94) drehbar  
10       gelagert ist,
  - das dritte Element (84) mit einem dritten Drehgelenk (85) verbunden ist, über das das vierte Element (86) um eine dritte Achse (95) drehbar gelagert ist,
  - die Achsen (93, 94, 95) im Wesentlichen durch einen gemeinsamen  
15       Punkt (91) verlaufen und
  - die erste Achse (93) mit der zweiten Achse (94) einen ersten Winkel ( $\varphi_1$ ) bildet und die zweite Achse (94) mit der dritten Achse (95) einen zweiten Winkel ( $\varphi_2$ ) bildet.
- 20   2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die erste Achse (93) im Wesentlichen senkrecht zur Hauptebene des ersten Elements (80a, 80b) verläuft.
3. Vorrichtung nach einem der vorigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass  
25       die erste Achse (93) um eine durch den gemeinsamen Punkt (91) verlaufende Vertikalachse um einen dritten Winkel ( $\alpha$ ) mit einem Wert ungleich Null gedreht ist.
4. Vorrichtung nach einem der vorigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass  
30       die erste Achse (93) um eine durch den gemeinsamen Punkt (91) verlaufende Horizontalachse um einen vierten Winkel ( $\beta$ ) mit einem Wert ungleich Null gedreht ist.



- 79 -

5. Vorrichtung nach einem der vorigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der erste Winkel ( $\varphi_1$ ) einen Wert im Bereich von 25 - 45 Grad und bevorzugt 35 Grad hat.
- 5 6. Vorrichtung nach einem der vorigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der zweite Winkel ( $\varphi_2$ ) einen Wert im Bereich von 60 - 80 Grad und bevorzugt 70 Grad hat.
7. Vorrichtung nach einem der vorigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass  
10 der dritte Winkel ( $\alpha$ ) und/oder der vierte Winkel ( $\beta$ ) einen Wert im Bereich von 10 - 30 Grad und bevorzugt 20 Grad hat.
8. Vorrichtung nach einem der vorigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass  
15 die Summe des ersten Winkels ( $\varphi_1$ ) und des zweiten Winkels ( $\varphi_2$ ) im Bereich von 85 - 120 Grad liegt und der erste Winkel ( $\varphi_1$ ) in dem Bereich von 15 - 45 Grad liegt.
9. Vorrichtung nach einem der vorigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass  
20 mindestens eines der Elemente (82, 84, 86) unterteilt ist in mindestens zwei Teilelemente (82a, b, c) und benachbarte dieser Teilelemente (82a, b, c) untereinander drehbar verbunden sind und zwar jeweils um eine Achse (94a, 94b, 94c), wobei diese Achsen im Wesentlichen durch den gemeinsamen Punkt (91) verlaufen.
- 25 10. Vorrichtung auch nach einem der vorigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass ein fünftes Element (90; 9000) drehbar um eine weitere Achse (910) gelagert ist und eine Fläche (904) aufweist, die im Wesentlichen parallel zu der weiteren Achse (910) verläuft, wobei diese Fläche (904) zumindest auf ihrer von der Achse (910) abgewandten Seite ein Profil aufweist, das mindestens zwei  
30 Kreissegmenten mit unterschiedlichen Radien entspricht.

- 80 -

11. Vorrichtung nach dem vorigen Anspruch, dadurch gekennzeichnet, dass die zu den genannten Kreissegmenten gehörigen Kreise ihre Mittelpunkte in der Nähe des Nutzers haben und/oder parallel zur Frontalebene des Nutzers liegen.
- 5 12. Vorrichtung auch nach einem der vorigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass Befestigungsmittel vorgesehen sind, die derart gestaltet und angeordnet sind, dass ein Nutzer bevorzugterweise mit seiner Hüfte, seinem Torso und/oder seinen Oberschenkeln fest mit wenigstens einem der Elemente (80a, 80b; 82; 84; 86; 90) und/oder mit Teilen einer Rückenplatte verbunden werden kann.
- 10 13. Vorrichtung nach dem vorigen Anspruch, dadurch gekennzeichnet, dass die Befestigungsmittel Bänder, Schalen und/oder Geschirr enthalten.
14. Vorrichtung nach einem der beiden vorigen Ansprüche, dadurch
- 15 gekennzeichnet, dass die Befestigungsmittel derart gestaltet und angeordnet sind, dass der Nutzer mit dem ersten Element (80a, 80b) verbunden wird.
15. Vorrichtung nach einem der drei vorigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Position der Befestigungsmittel durch Stellmittel geändert werden kann.
- 20 16. Vorrichtung nach einem der vier vorigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Kraft, welche die Befestigungsmittel tragen, durch Stellmittel geändert werden kann.
- 25 17. Vorrichtung nach dem vorigen Anspruch, dadurch gekennzeichnet, dass die durch die Befestigungsmittel getragene Kraft gemessen und mittels der Stellmittel und eines Regelkreises beeinflusst werden kann.
18. Vorrichtung nach einem der vorigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass
- 30 Mittel vorgesehen sind, die geeignet sind, die Fußfläche (904) relativ zu dem Nutzer zu bewegen.

- 81 -

19. Vorrichtung nach einem der vorigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Befestigungsmittel derart gestaltet sind und ansteuerbar sind, dass sie entspannt oder bewegt werden können und somit der Grad der Entlastung geändert werden kann.
- 5
20. Vorrichtung auch nach einem der vorigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass ein Motor (124) vorgesehen ist, der mit einer Spindel (114) derart verbunden ist, dass er sie bei Betrieb drehbar antreibt, und die Spindel (114) dabei Mittel (117, 118) mit entsprechendem Gewinde translatorisch bewegt, wobei diese Mittel (117, 118) mit mindestens einem umlaufenden Element (110, 113) verbunden sind, die dabei eine Welle (101) rotatorisch bewegt.
- 10
21. Vorrichtung nach dem vorigen Anspruch, dadurch gekennzeichnet, dass das umlaufende Element (110, 113) ein Antriebsrad (108, 111) antreibt, welches kraftschlüssig und/oder formschlüssig mit einer Antriebsachse (101) verbunden ist.
- 15
22. Vorrichtung nach einem der beiden vorigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Mittel (117, 118) mit Führungsmitteln verbunden sind, so dass axiale und/oder transversale Drehmomente aufgenommen werden.
- 20
23. Vorrichtung nach einem der drei vorigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass wenigstens zwei vorige Vorrichtungen je eine Welle (101) rotatorisch bewegen und mindestens an einer Welle (101) einer vorigen Vorrichtung für eine andere vorige Vorrichtung Umlenkmittel (109, 112) mit geeigneten Lagern (129) angebracht sind.
- 25
24. Vorrichtung nach einem der vier vorigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass wenigstens ein Federelement (127) zwischen Motor und dem angetriebenen Element (X) und/oder an Motor und/oder dem angetriebenen Element (X) vorhanden ist.
- 30

- 82 -

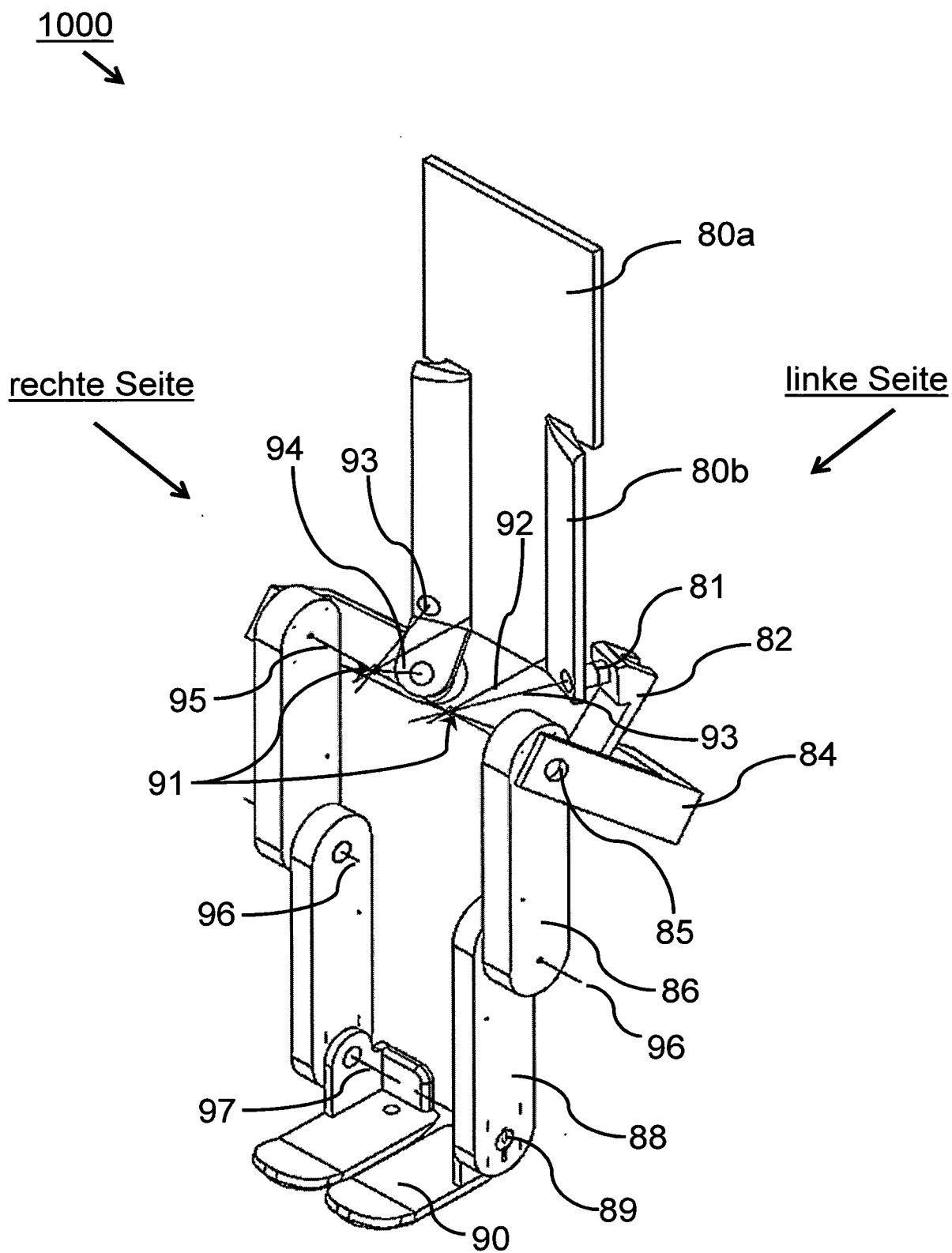
25. Vorrichtung nach einem der fünf vorigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass als flexibles Element Ketten mit Phasenunterschied zueinander verwendet werden.
- 5 26. Vorrichtung auch nach einem der vorigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass eine Rotationseinheit (211) vorgesehen ist mit
- einem ersten Rotationselement (200), das drehbar um eine erste Rotationsachse (205) gelagert ist,
  - einem zweiten Rotationselement (201), das an dem ersten
  - 10 Rotationselement (200) drehbar um eine zweite Rotationsachse (206) gelagert ist,
  - einem dritten Rotationselement (202), das an dem zweiten Rotationselement (201) drehbar um eine dritte Rotationsachse (207) gelagert ist,
  - 15 - ein Exoskelett (203) an dem dritten Rotationselement (202) drehbar um eine vierte Rotationsachse (208) gelagert ist.
27. Vorrichtung nach dem vorigen Anspruch, dadurch gekennzeichnet, dass die Befestigung zwischen dem Exoskelett (203) und dem dritten Rotationselement
- 20 (202) in Neutralstellung oberhalb der Verbindung zwischen dem dritten Rotationselement (202) und dem zweiten Rotationselement (201) angeordnet ist.
28. Vorrichtung nach einem der beiden vorigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass zwischen dem Exoskelett (203) und dem dritten Rotationselement (202) eine Rückenhalterung (204) angeordnet ist.
- 25 29. Vorrichtung nach einem der drei vorigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das Exoskelett (203) und/oder dessen Arbeitsraum und/oder seine Rückenhalterung (204) und/oder ein am Exoskelett (203) befestigter Nutzer, bei
- 30 einer vollständigen 360 Grad Drehung um die vierte Rotationsachse (208) mit anderen Teilen der Vorrichtung kollidiert.

- 83 -

30. Vorrichtung nach dem vorigen Anspruch, dadurch gekennzeichnet, dass mechanische und/oder elektrische Mittel vorgesehen sind, wie mechanische oder elektronische Begrenzer und/oder passend ausgelegte Bauteile wie Achsen, Getriebe, Lager und/oder Motoren, die den Drehbereich des Exoskeletts (203) um die vierte Rotationsachse (208) so begrenzen, dass eine Kollision des Exoskeletts (203) und/oder dessen Arbeitsraums und/oder seiner Rückenhalterung (204) und/oder eines am Exoskelett (203) befestigten Nutzers mit anderen Teilen des Aufbaus vermieden wird.
31. Vorrichtung nach einem der vorigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens ein weiteres Rotationselement zwischen dem dritten Rotationselement (202) und dem Exoskelett (203) und/oder der Rückenhalterung (204) an beiden Enden drehbar befestigt ist, welches oder welche nicht um 360 Grad um die weiteren Rotationsachsen gedreht werden kann oder können, ohne mit dem Exoskelett (203) zu kollidieren.
32. Vorrichtung auch nach einem der vorigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens zwei Aktuatoren (304a-304f) vorgesehen sind, die mit einer ersten Seite mit einem festen Untergrund (303) verbunden sind und mit einer zweiten Seite mit einer Arbeitsplattform (302) verbunden sind, wobei ein Exoskelett (300) mittels einer Halterung (301) an der Arbeitsplattform (302) befestigt ist.
33. Vorrichtung nach dem vorigen Anspruch, dadurch gekennzeichnet, dass zwischen der zweiten Seite von mindestens einem der Aktuatoren (304a-304f) und der Arbeitsplattform eine Stütze (305a-305c) angeordnet ist.
34. Vorrichtung auch nach einem der beiden vorigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Abstand der Befestigungspunkte der Stützen am Untergrund größer ist, als die minimale Länge der Aktuatoren.
35. Vorrichtung auch nach einem der drei vorigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das Exoskelett mit der Plattform durch wenigstens ein

- 84 -

bewegliches Element (301), wie einer kardanischen Aufhängung oder einem Roboterarm, verbunden ist.

Fig. 1

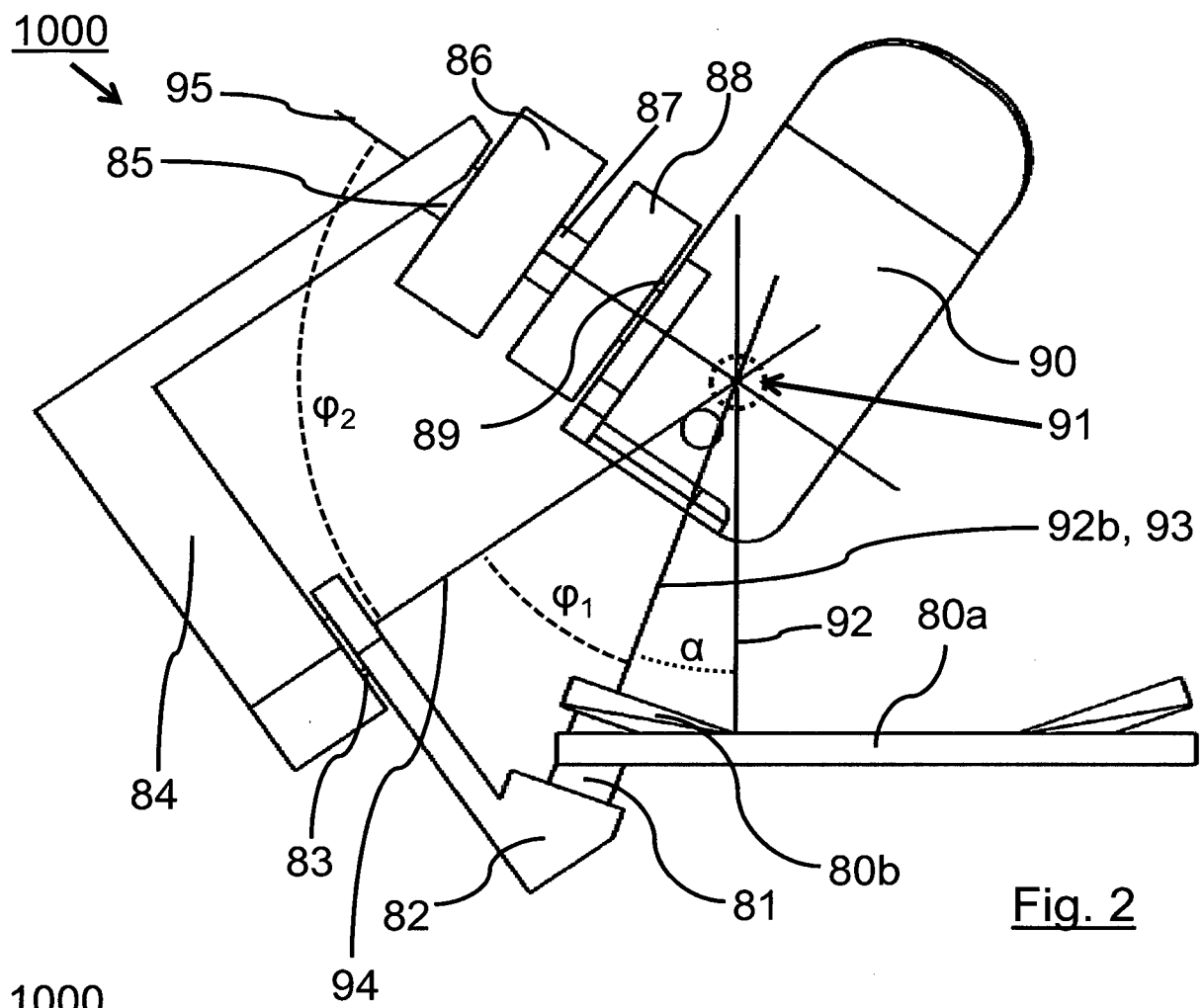


Fig. 2

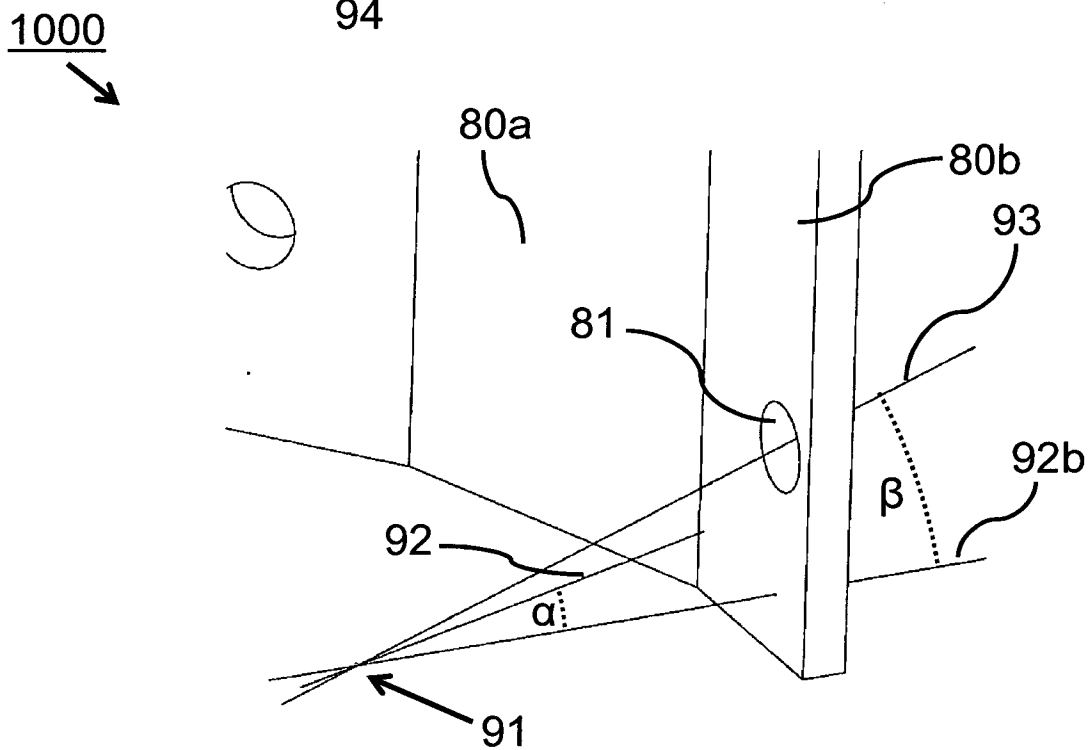
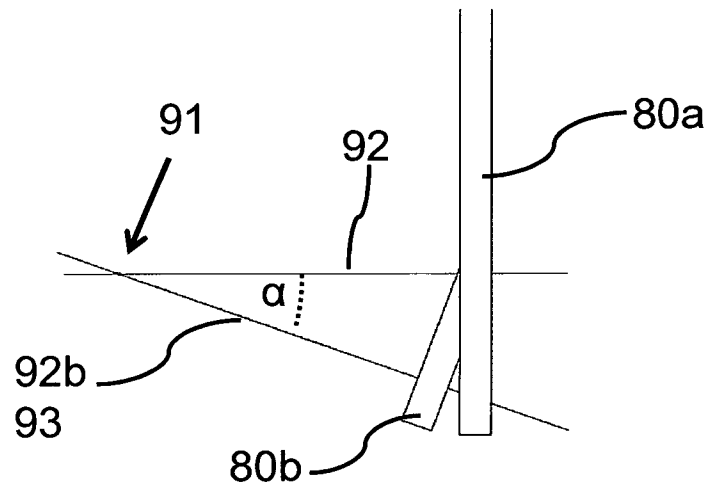
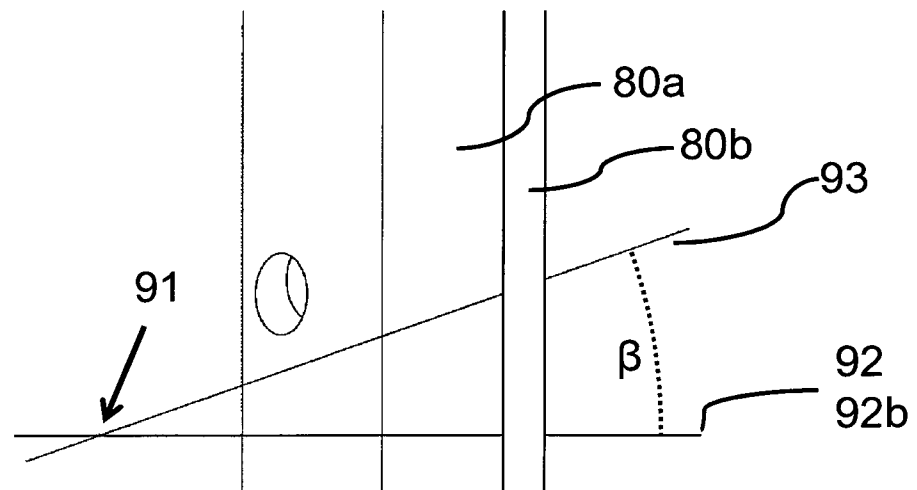


Fig. 3



Fig. 4Fig. 5

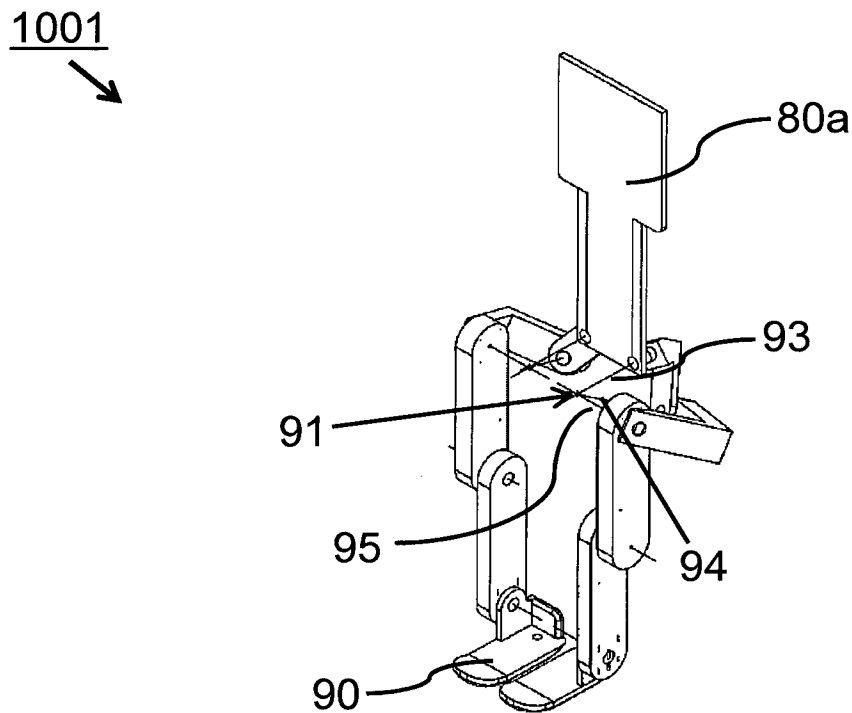


Fig. 6

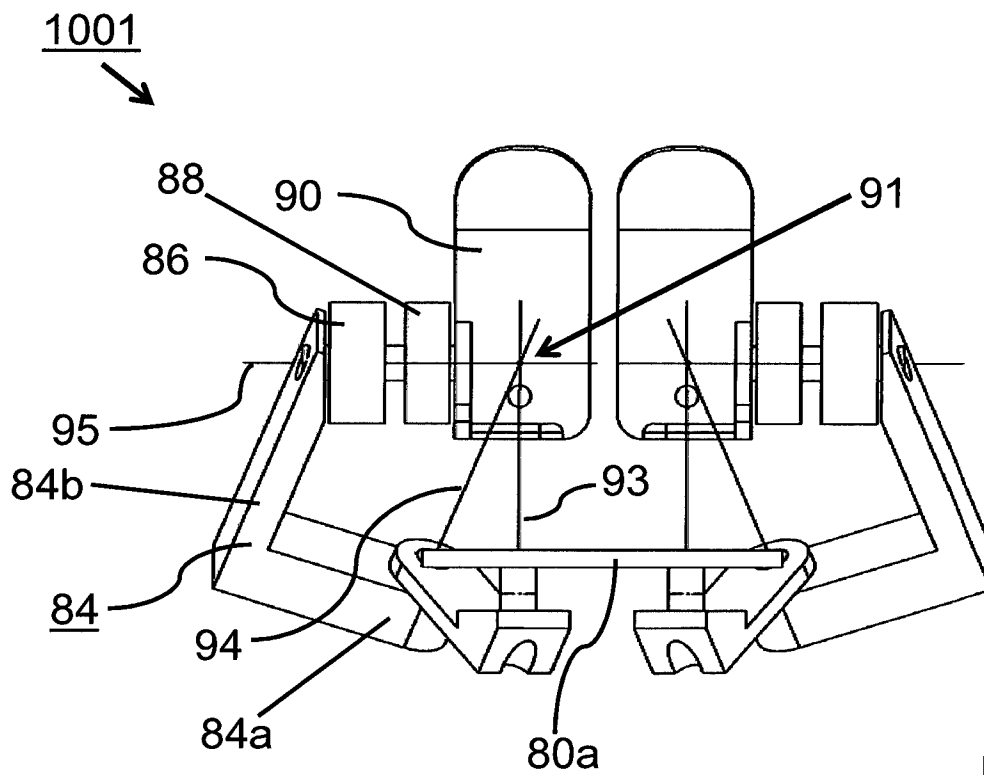


Fig. 7

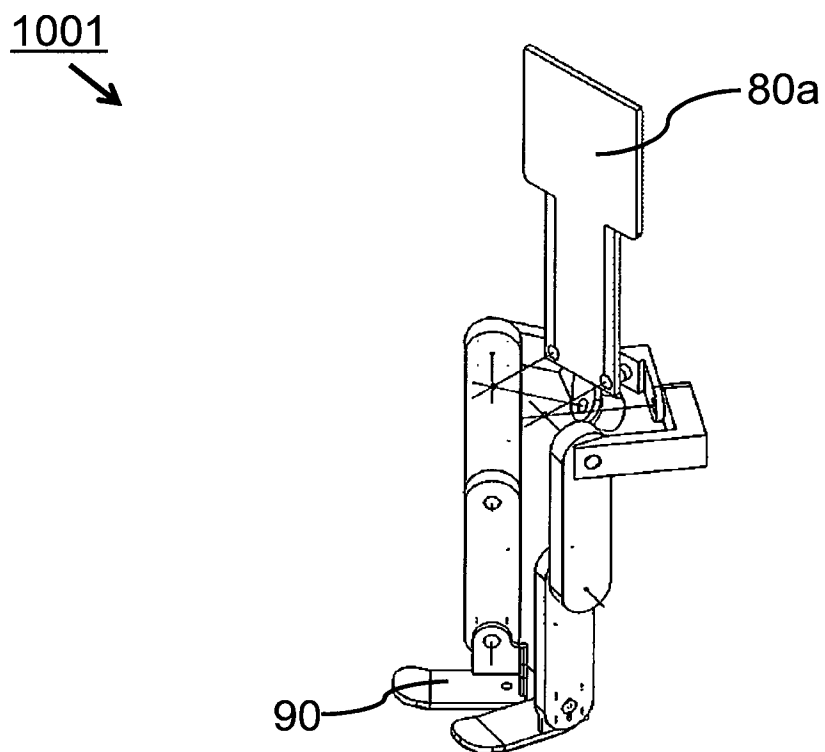


Fig. 8

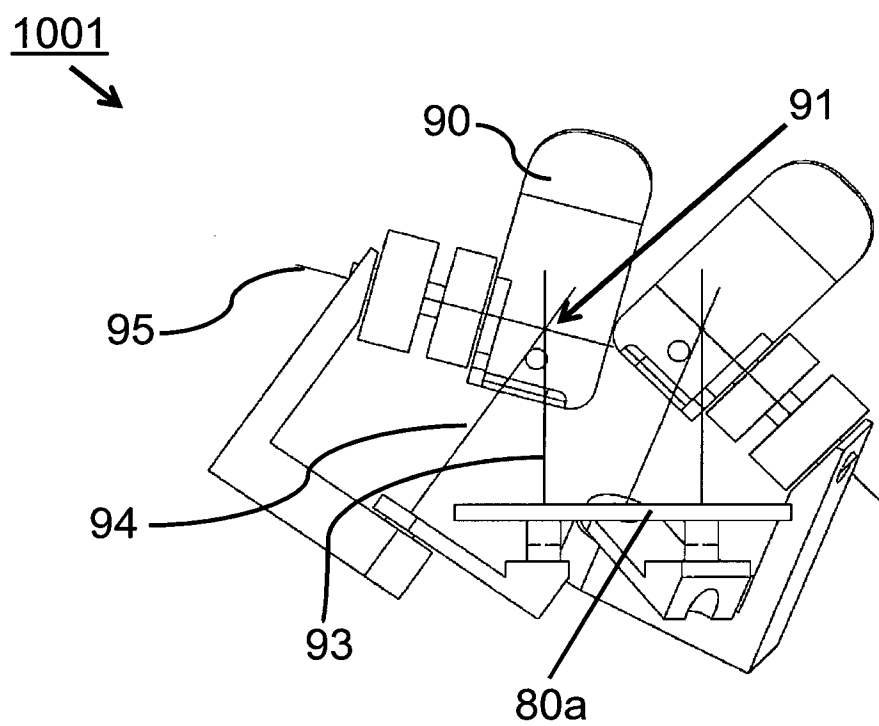


Fig. 9

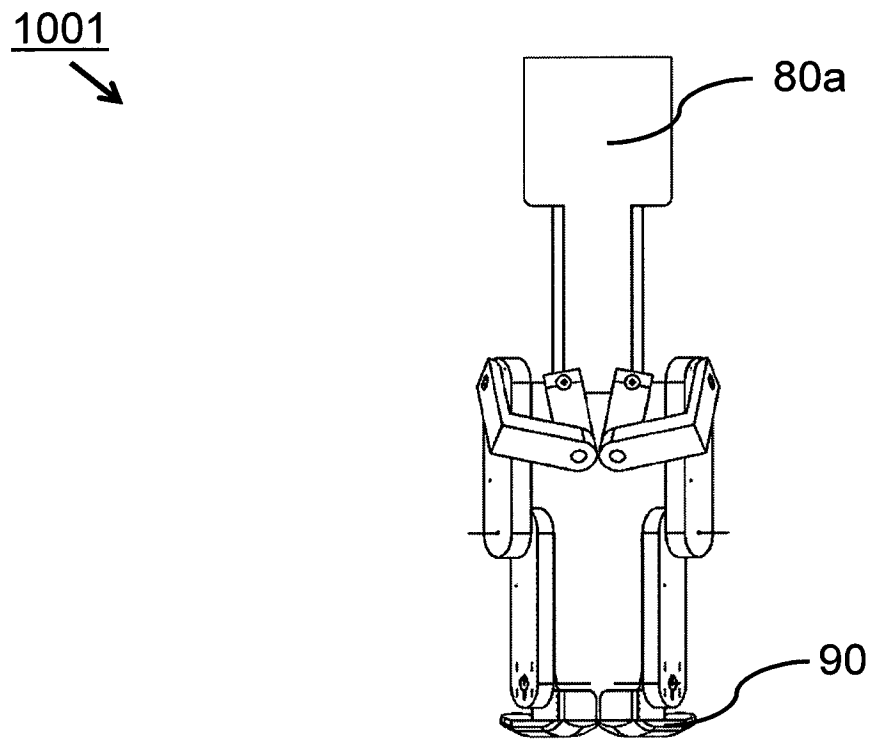


Fig. 10

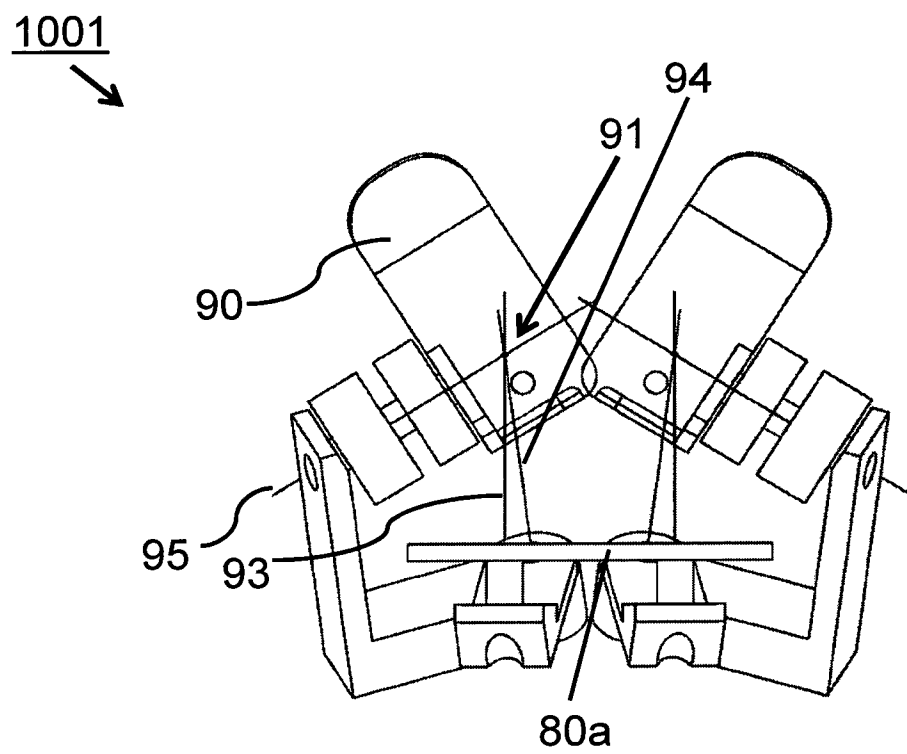


Fig. 11

1002  
↓

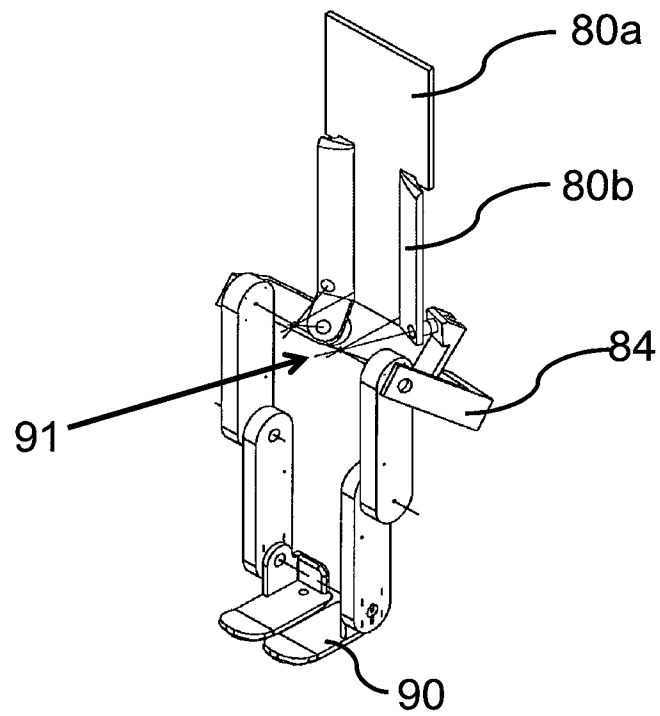


Fig. 12

1002  
↓

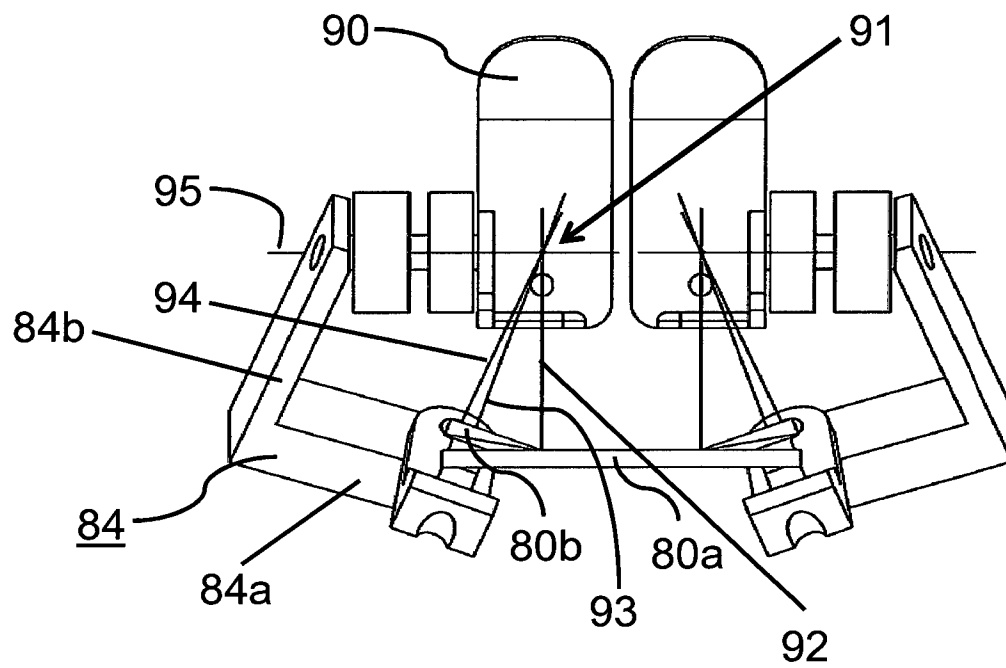


Fig. 13

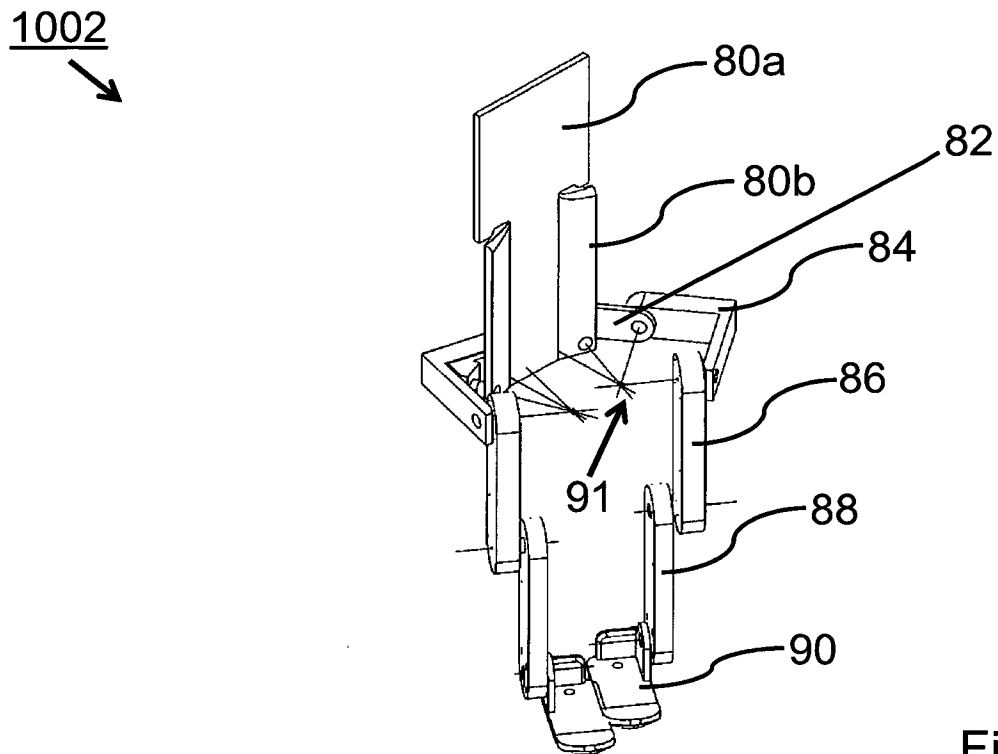


Fig. 14

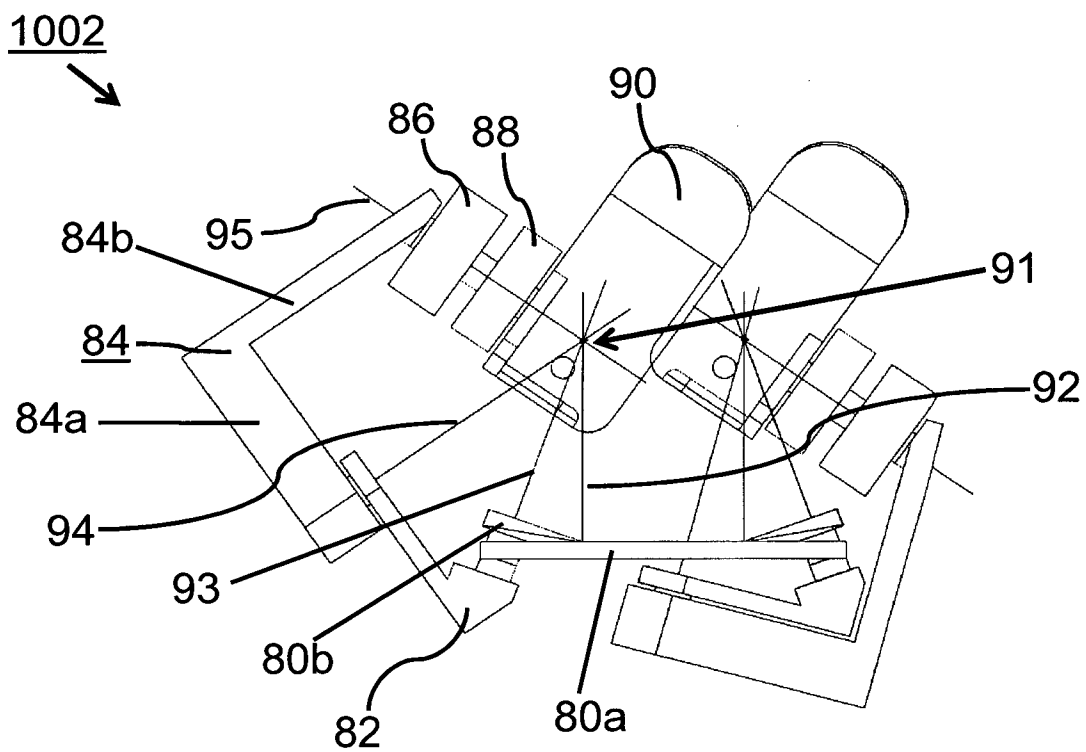


Fig. 15

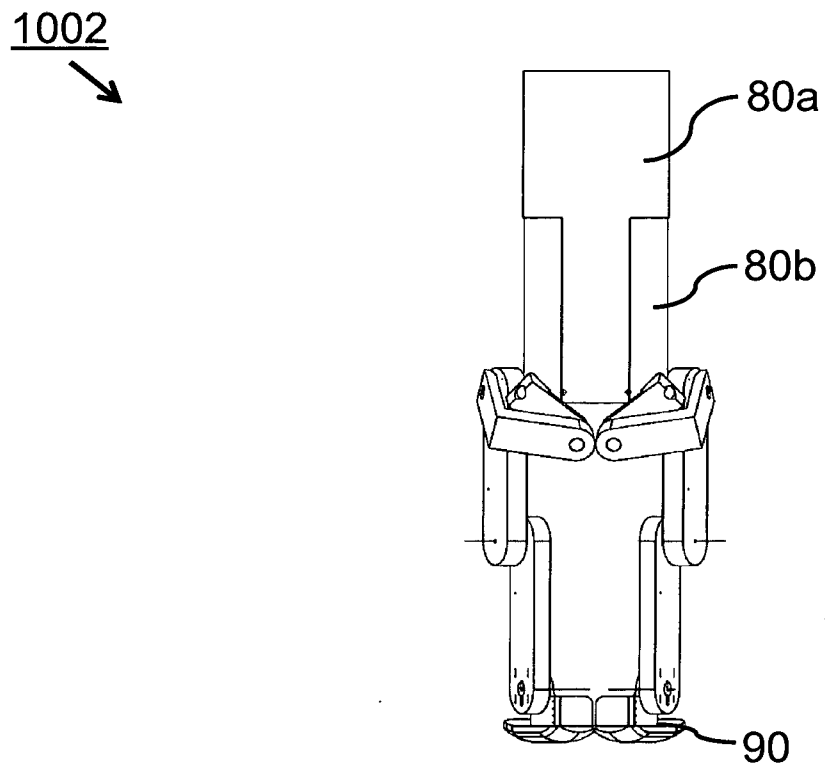


Fig. 16

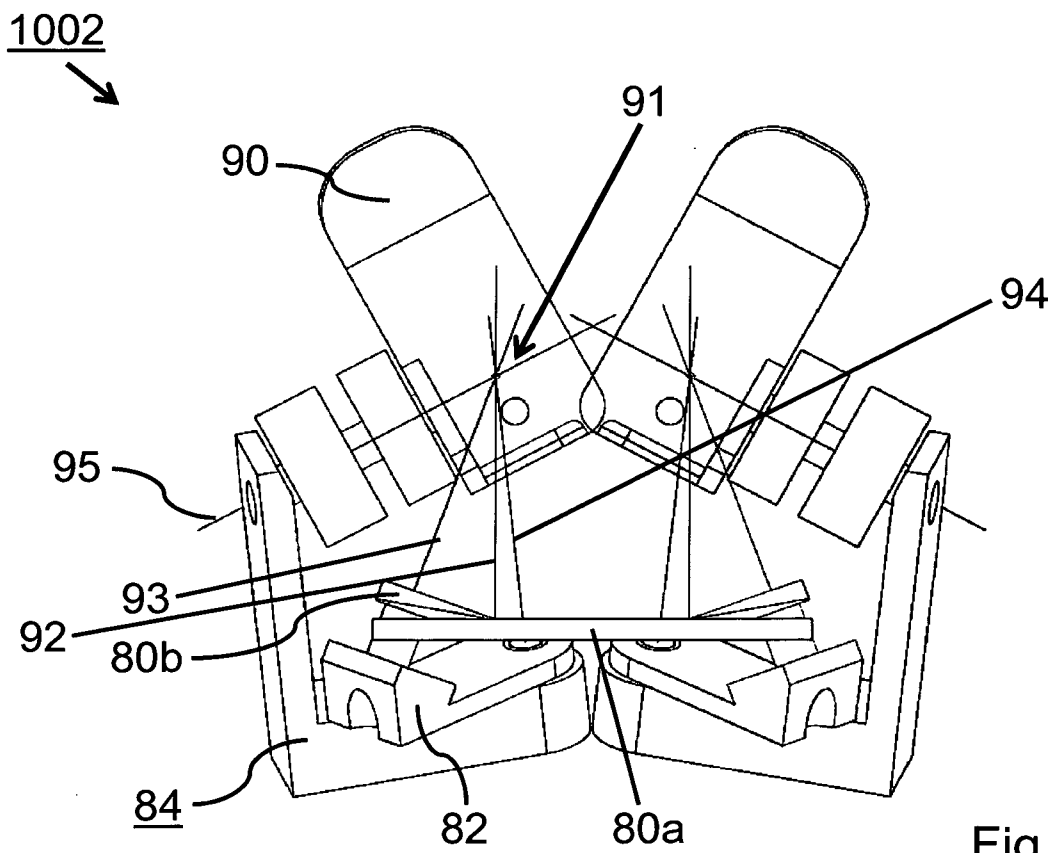


Fig. 17

1003  
↓

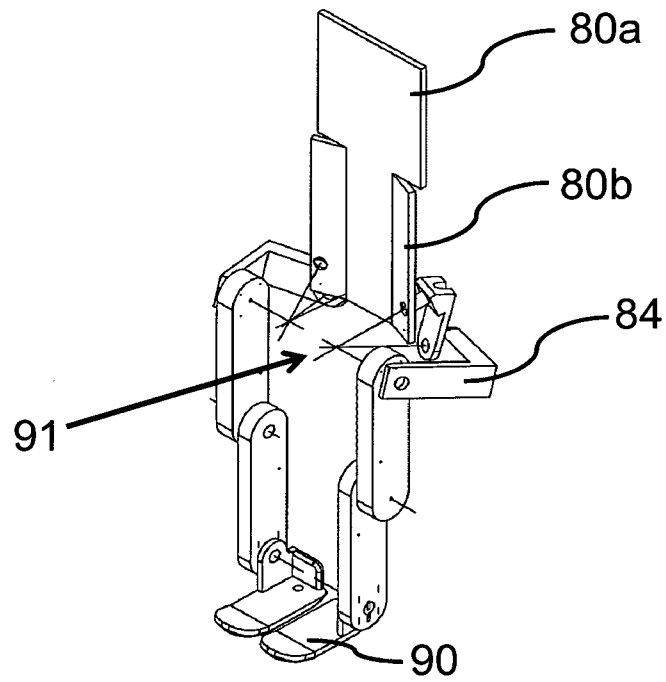


Fig. 18

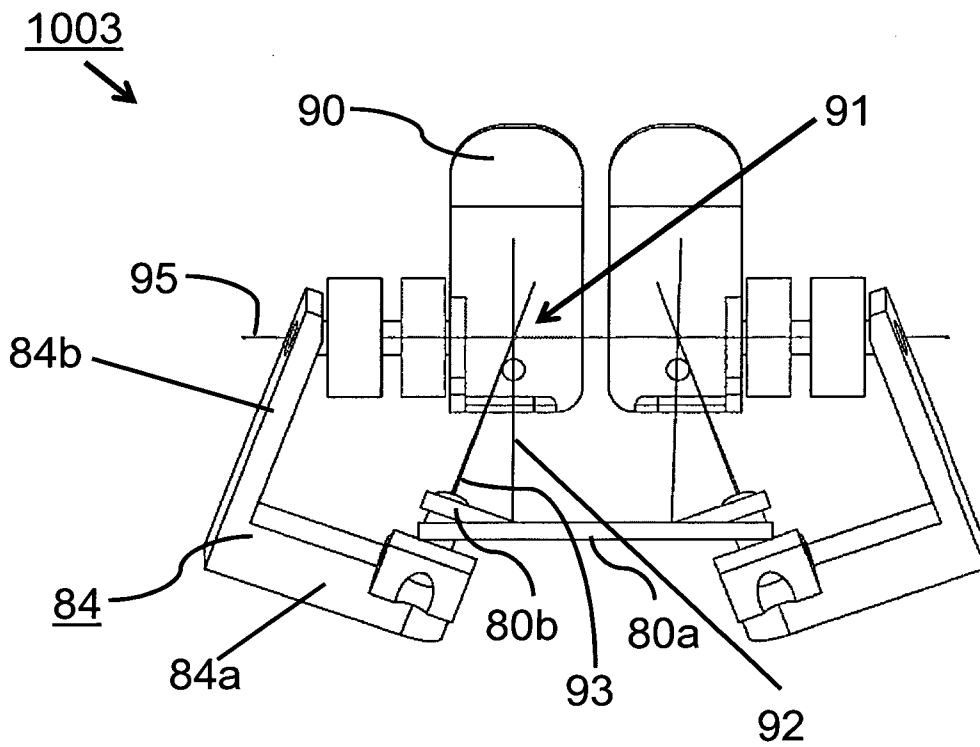


Fig. 19



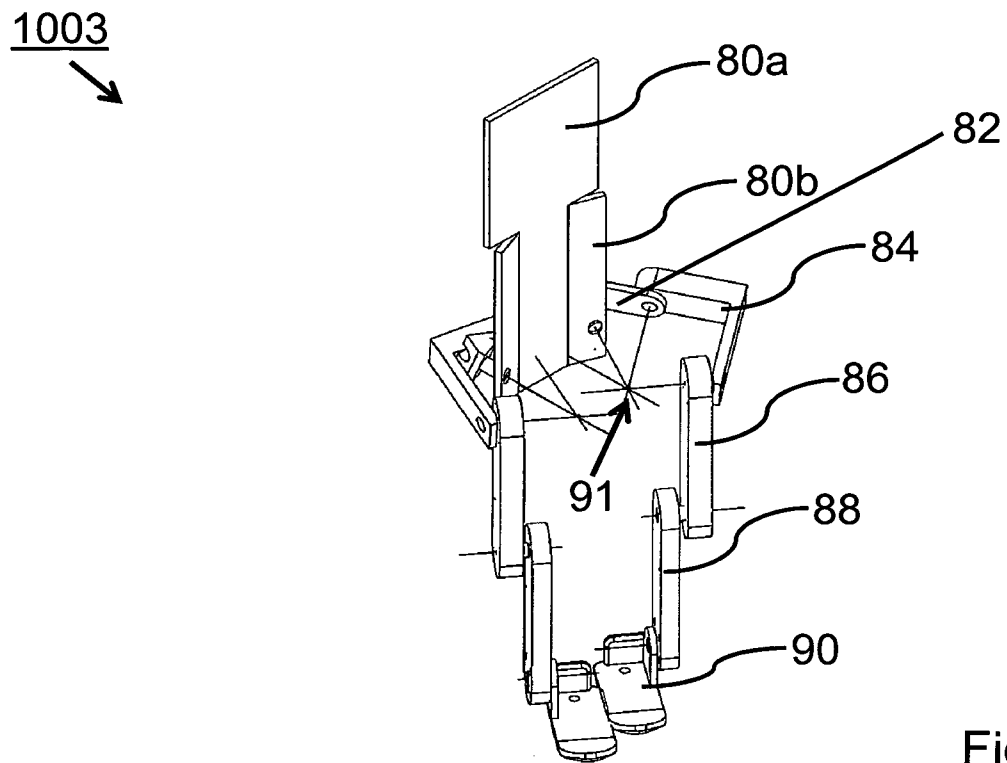


Fig. 20

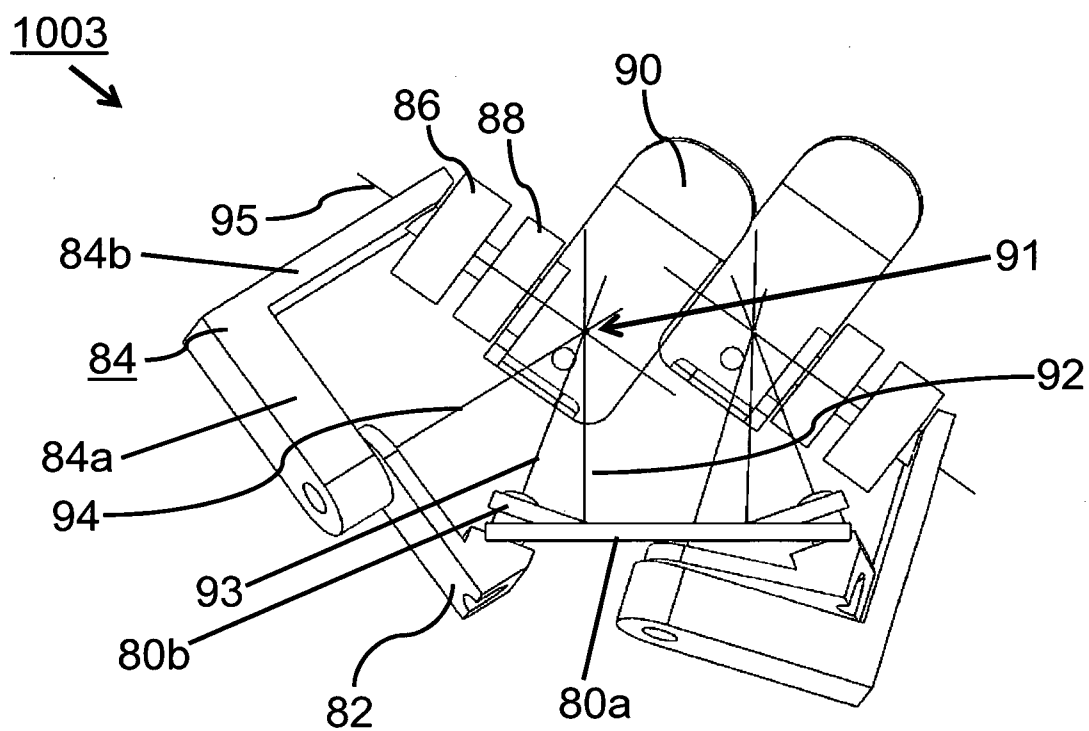


Fig. 21

1003  
↘

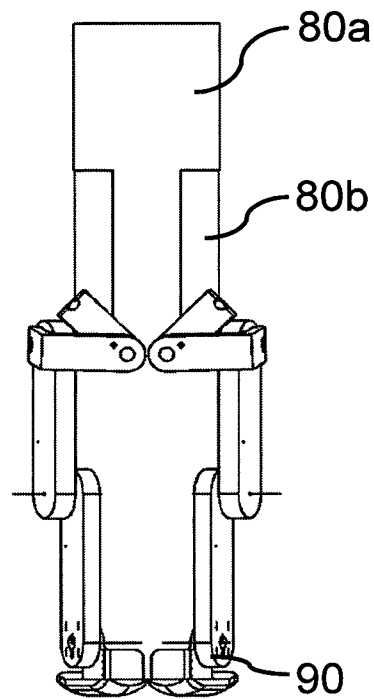


Fig. 22

1003  
↘

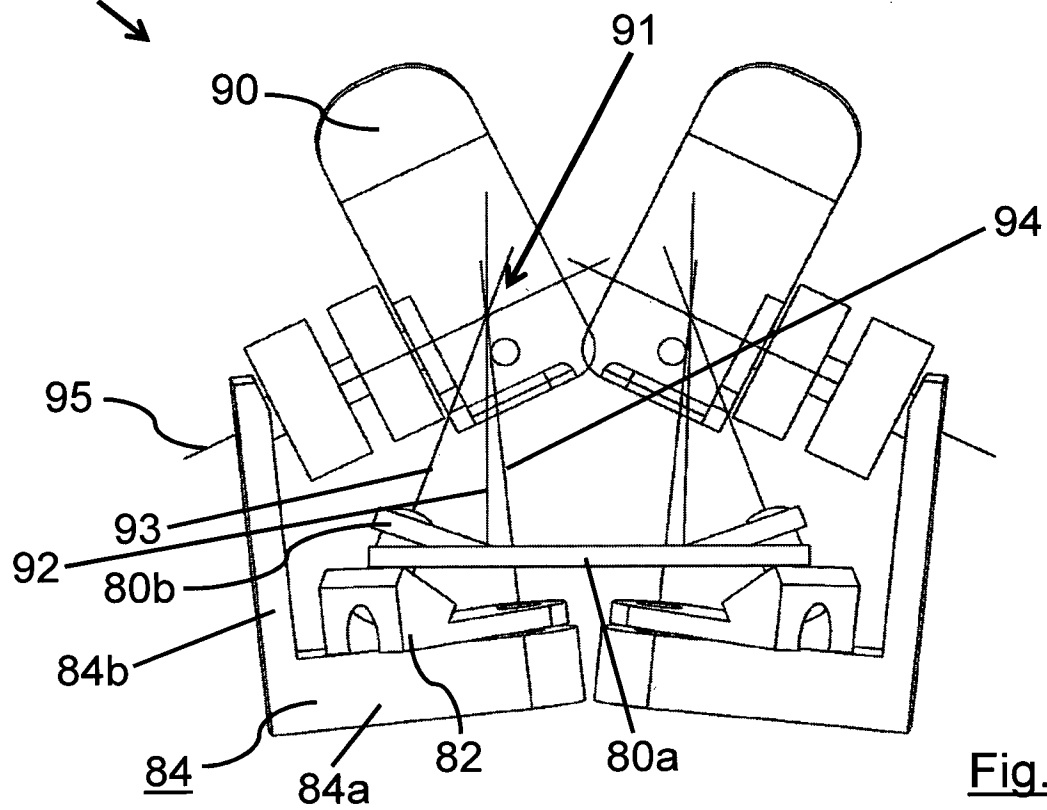


Fig. 23

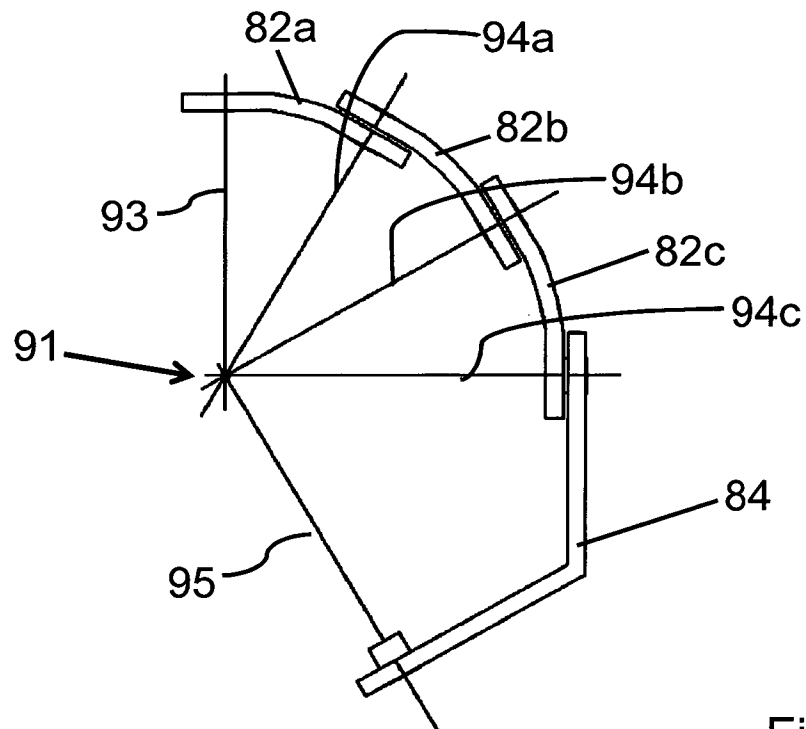


Fig. 24

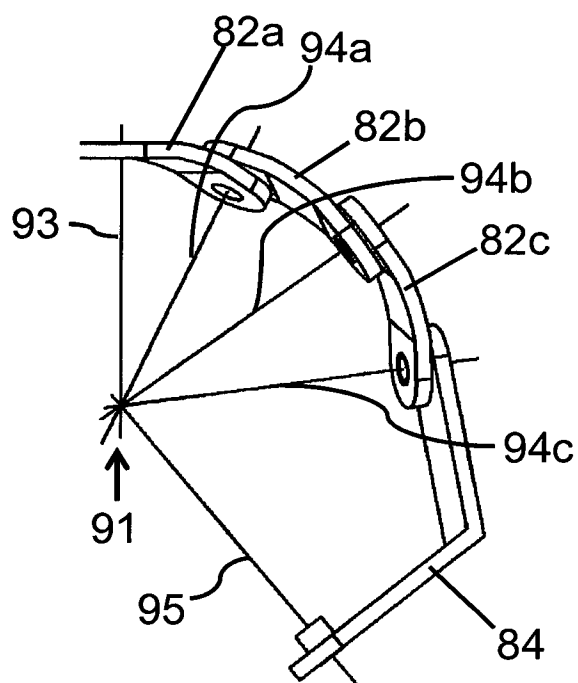


Fig. 25

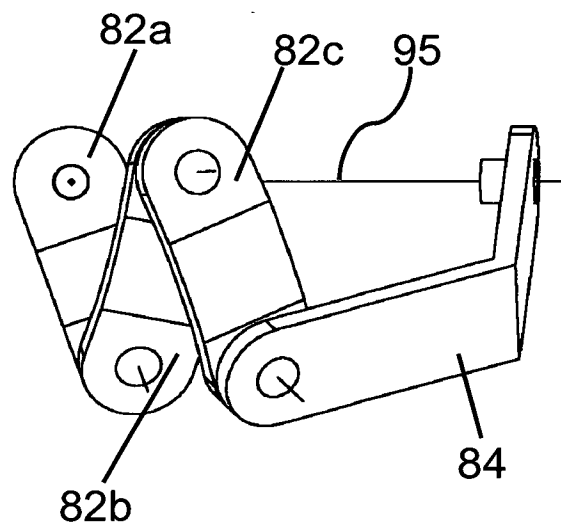
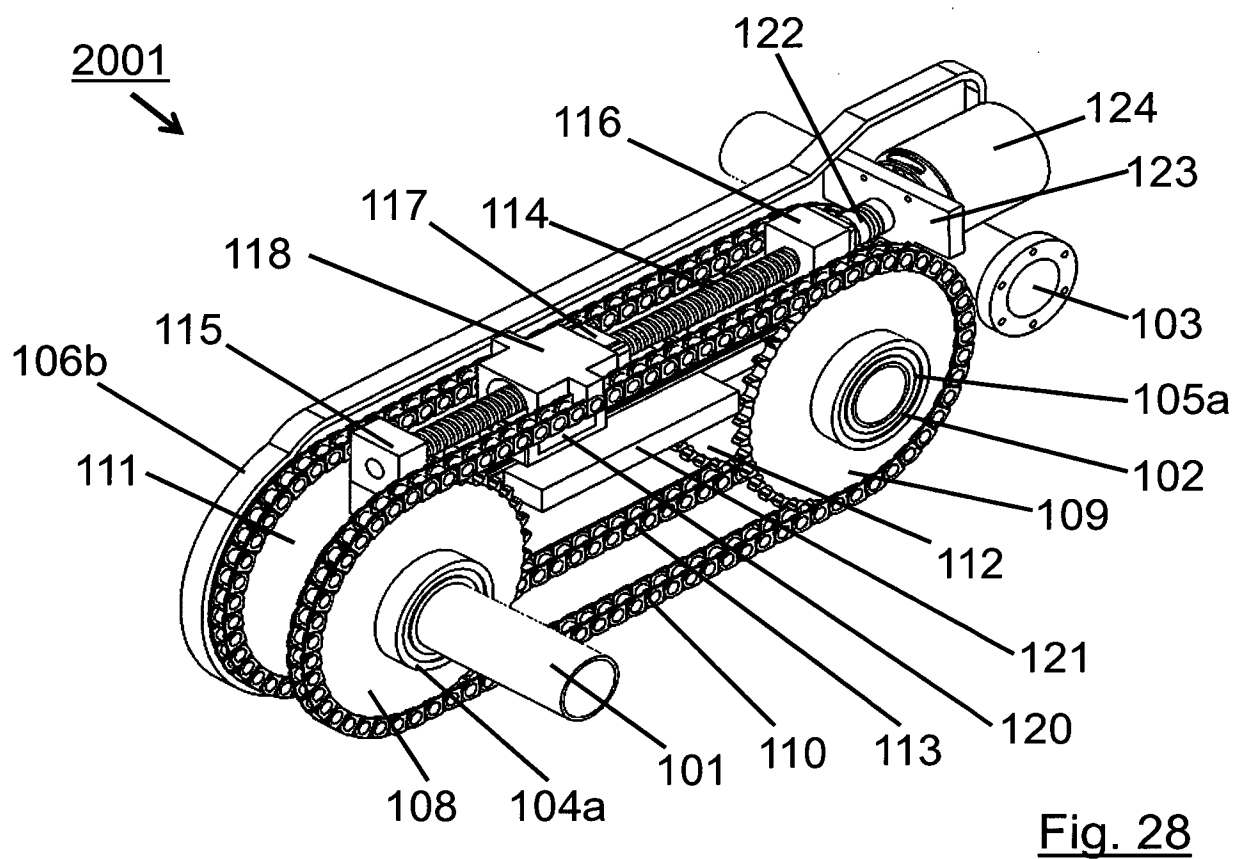
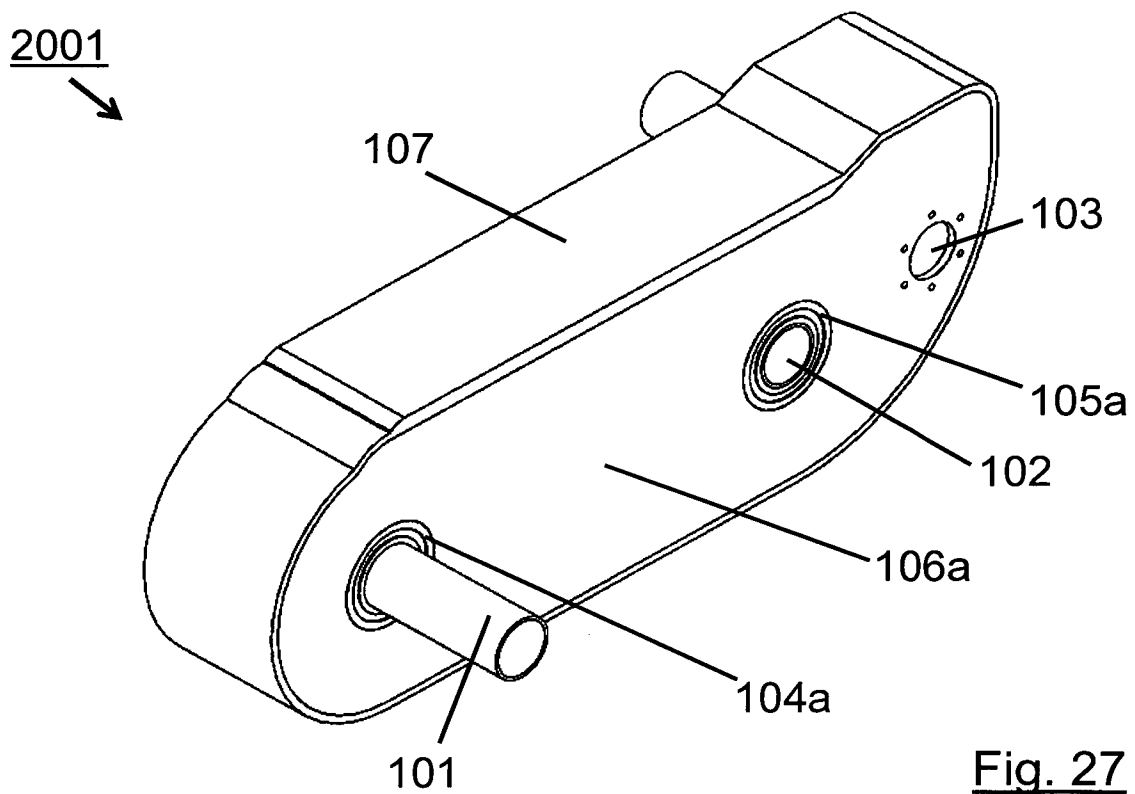


Fig. 26



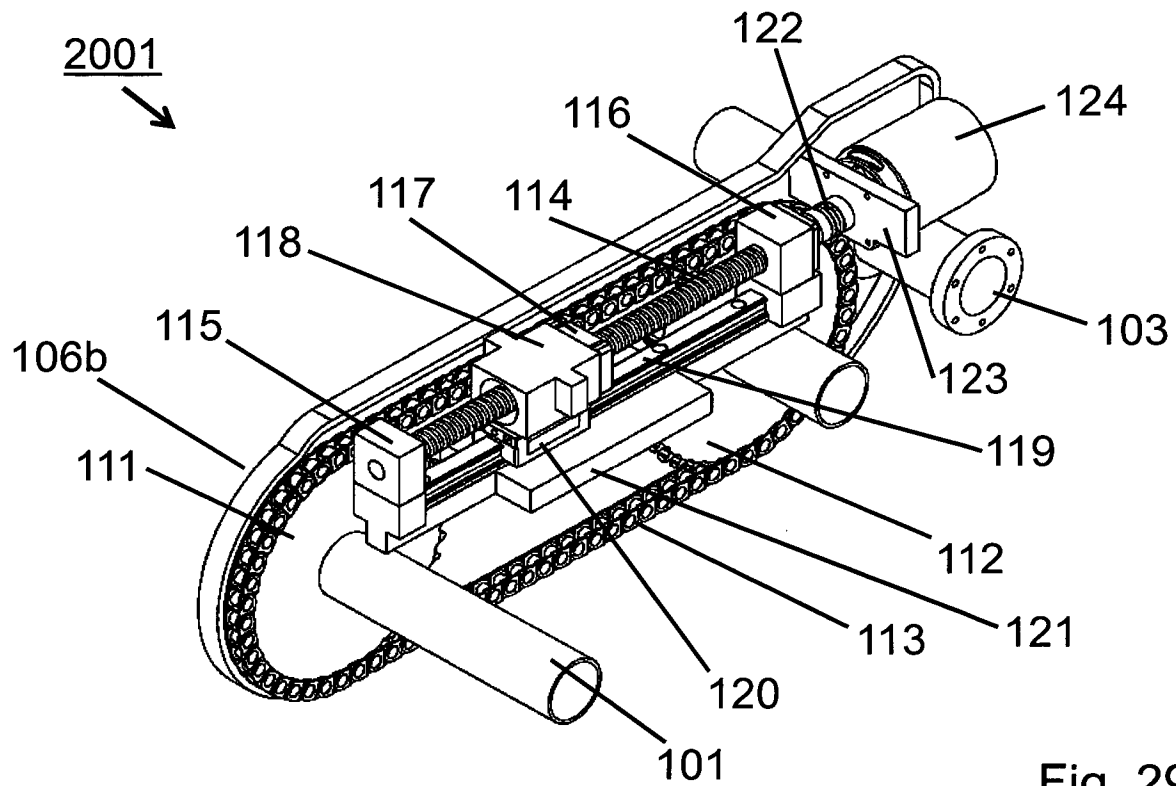


Fig. 29

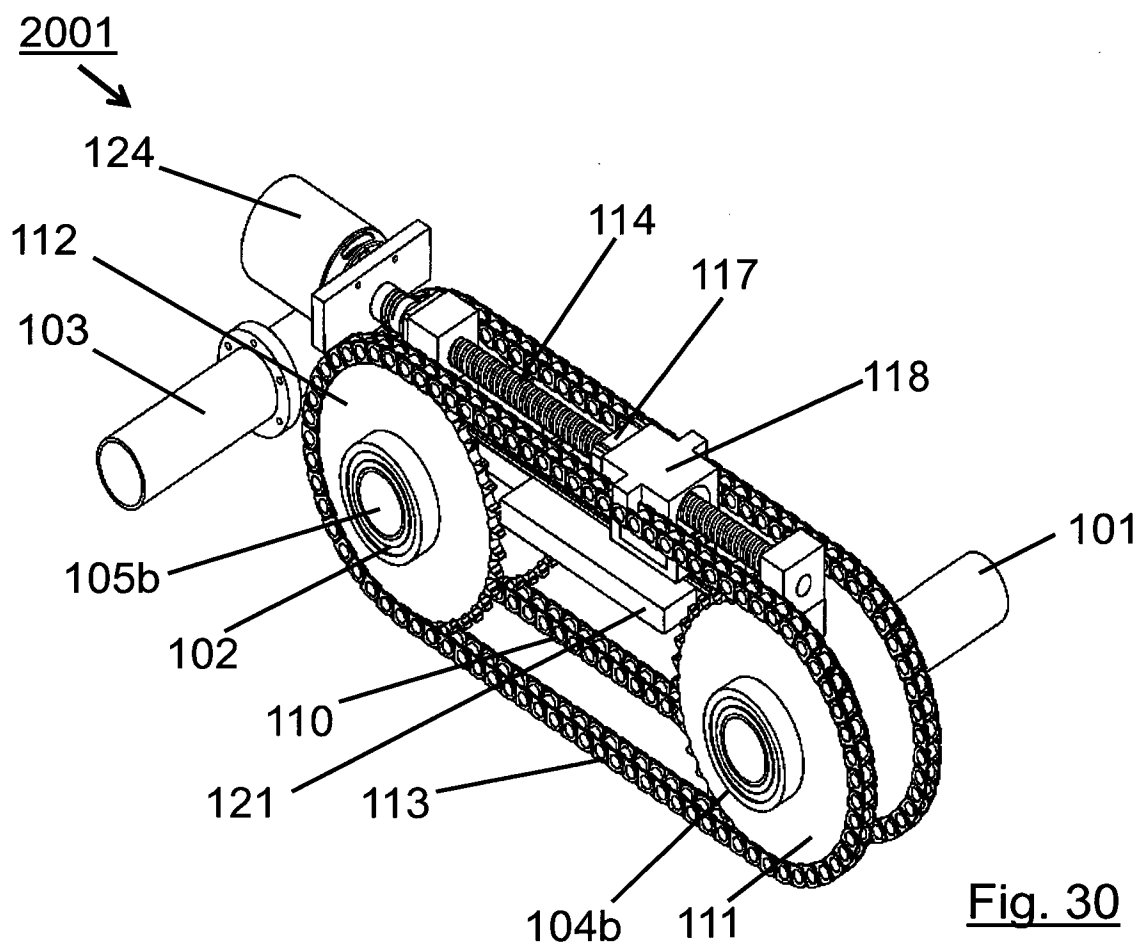
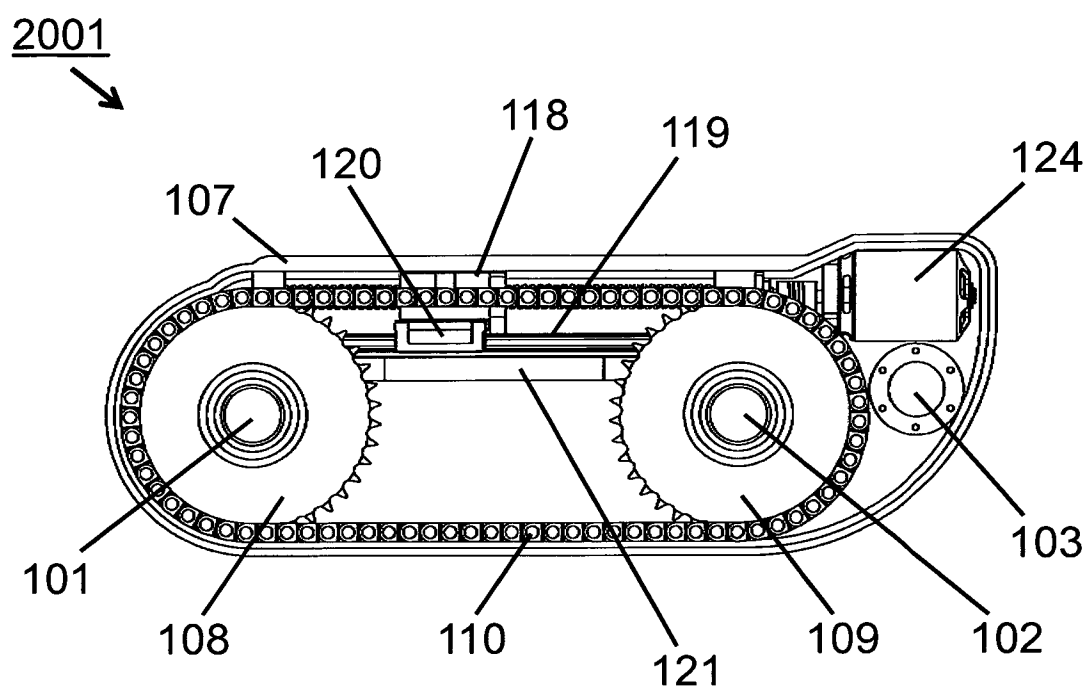
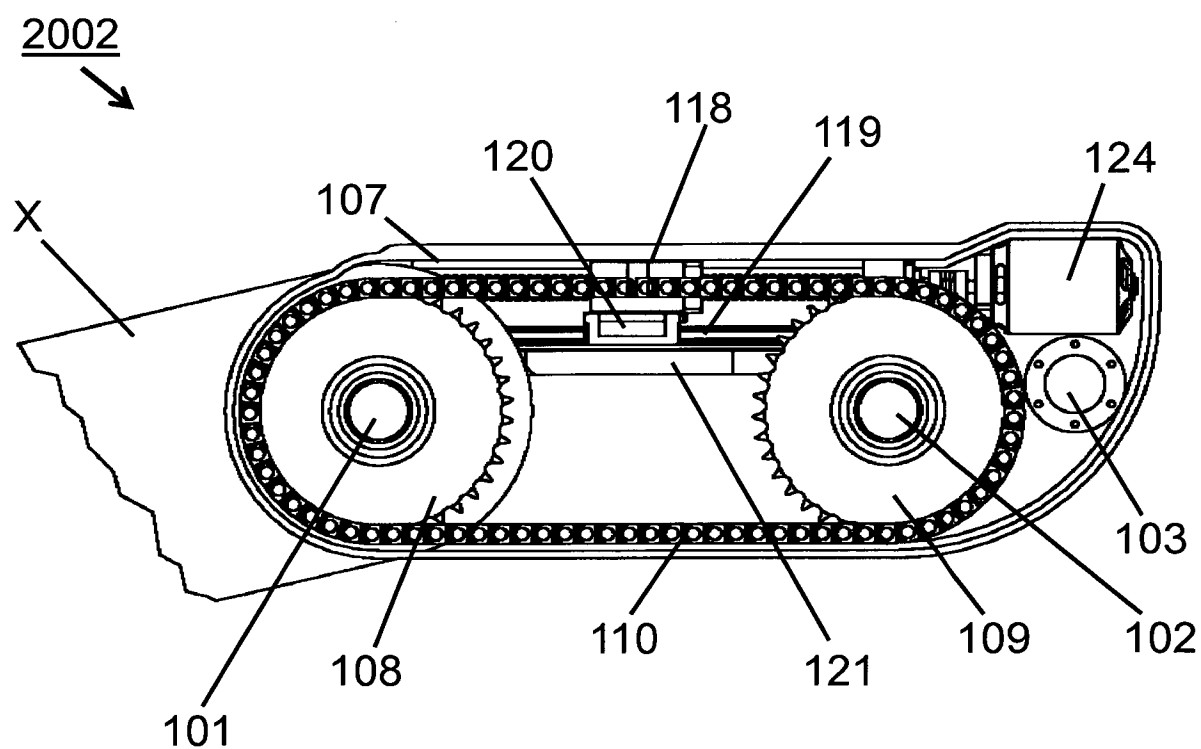
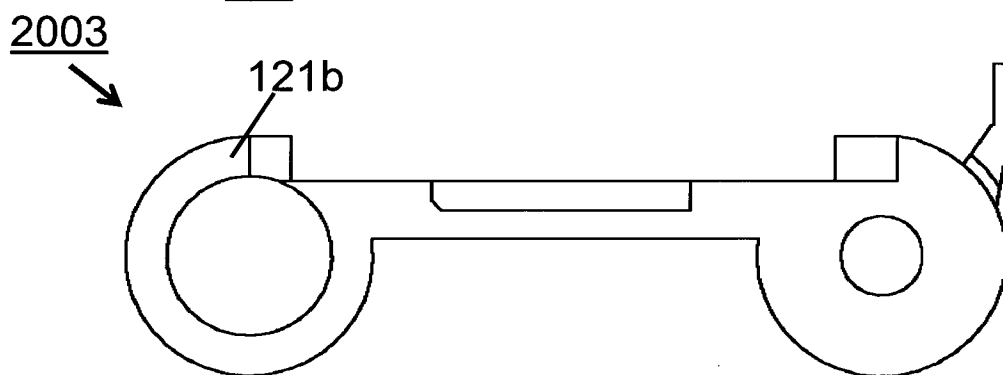
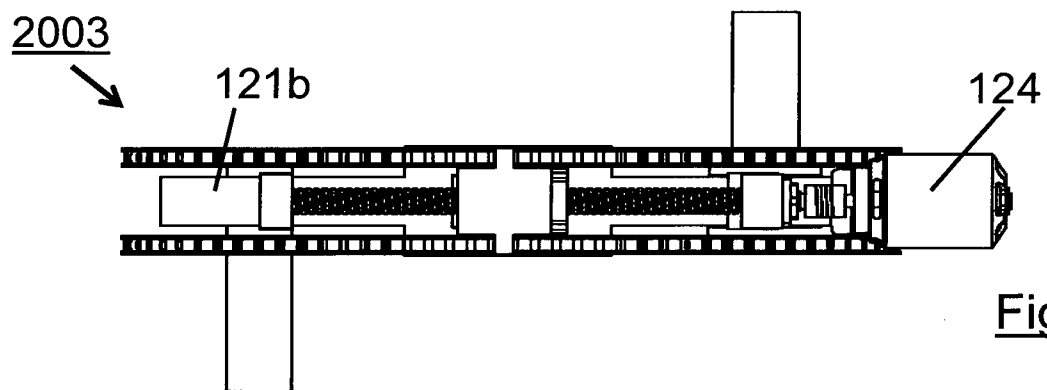
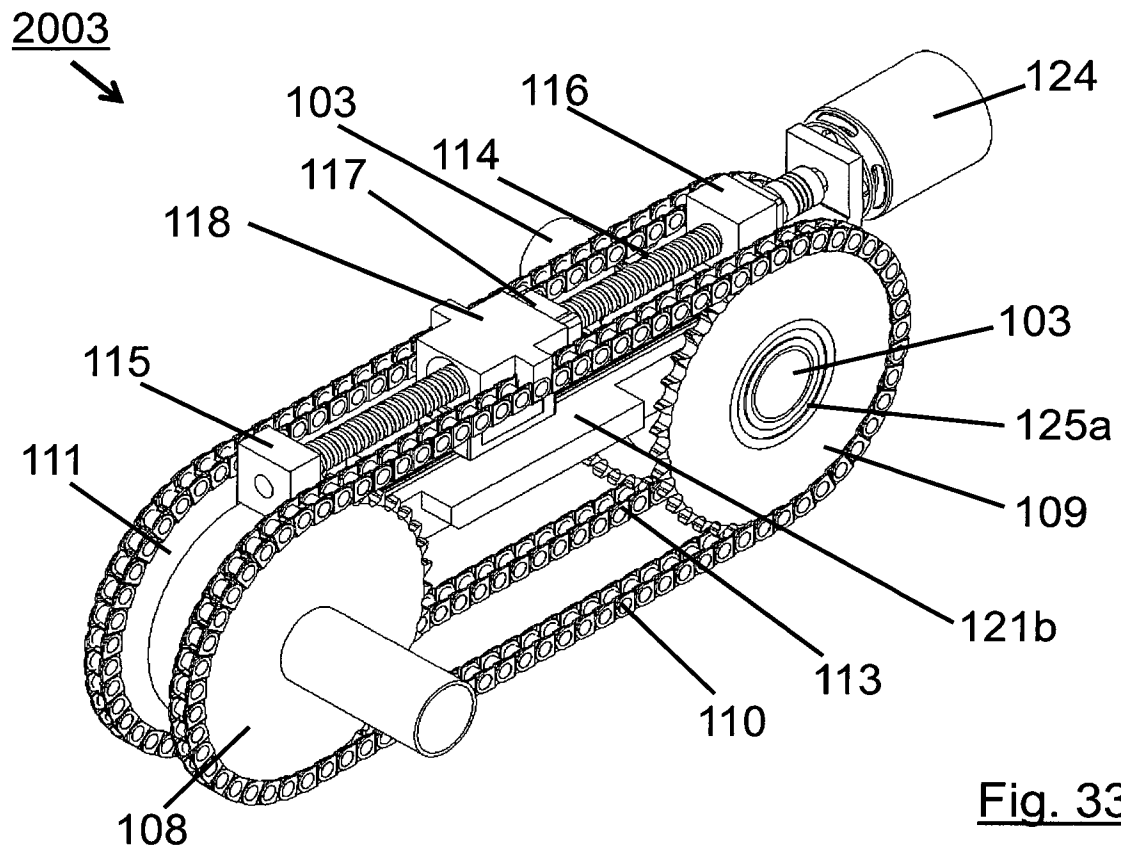


Fig. 30

Fig. 31Fig. 32



2003  
↓

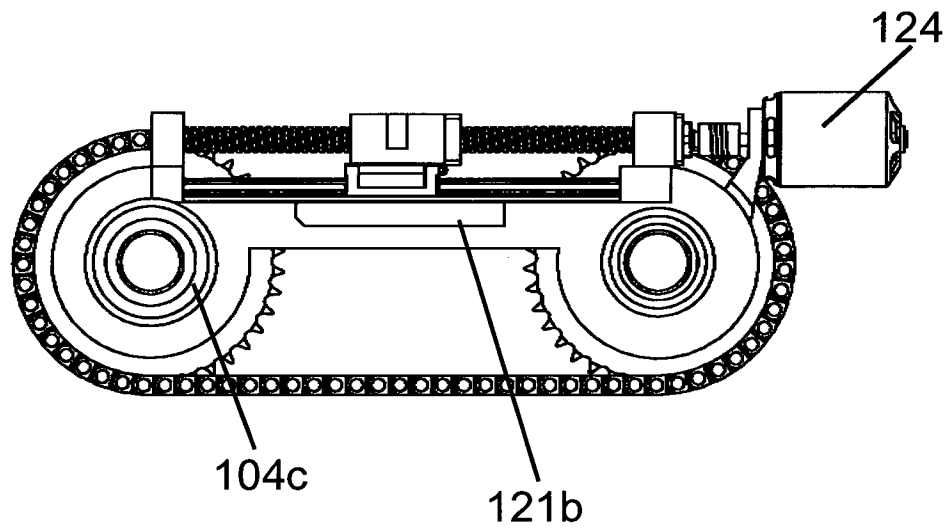


Fig. 36

2003  
↓

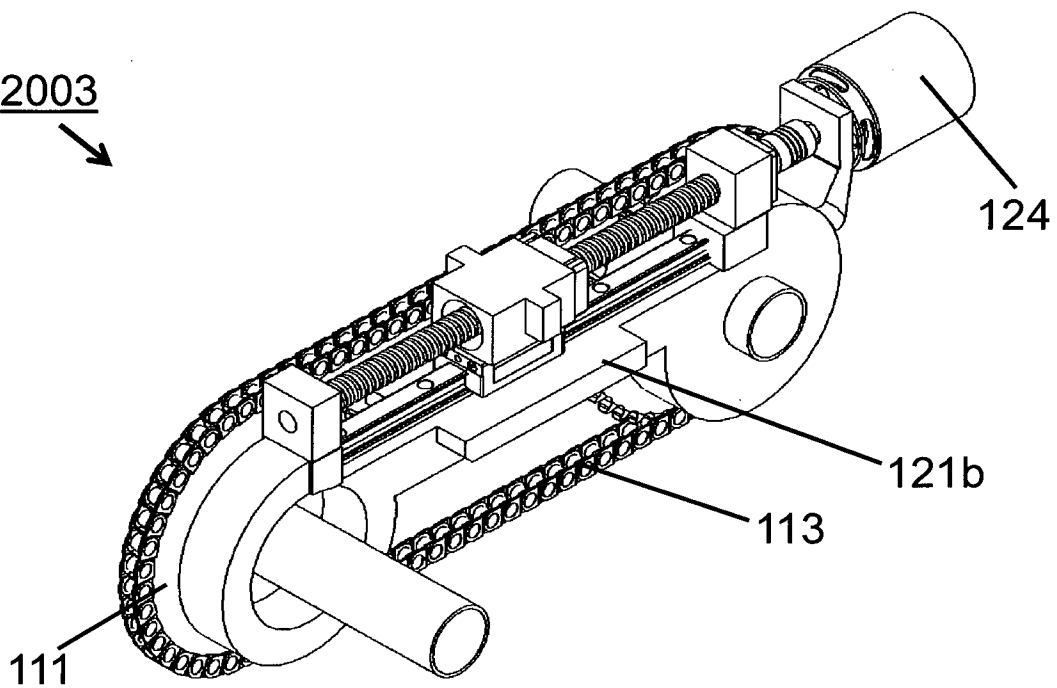
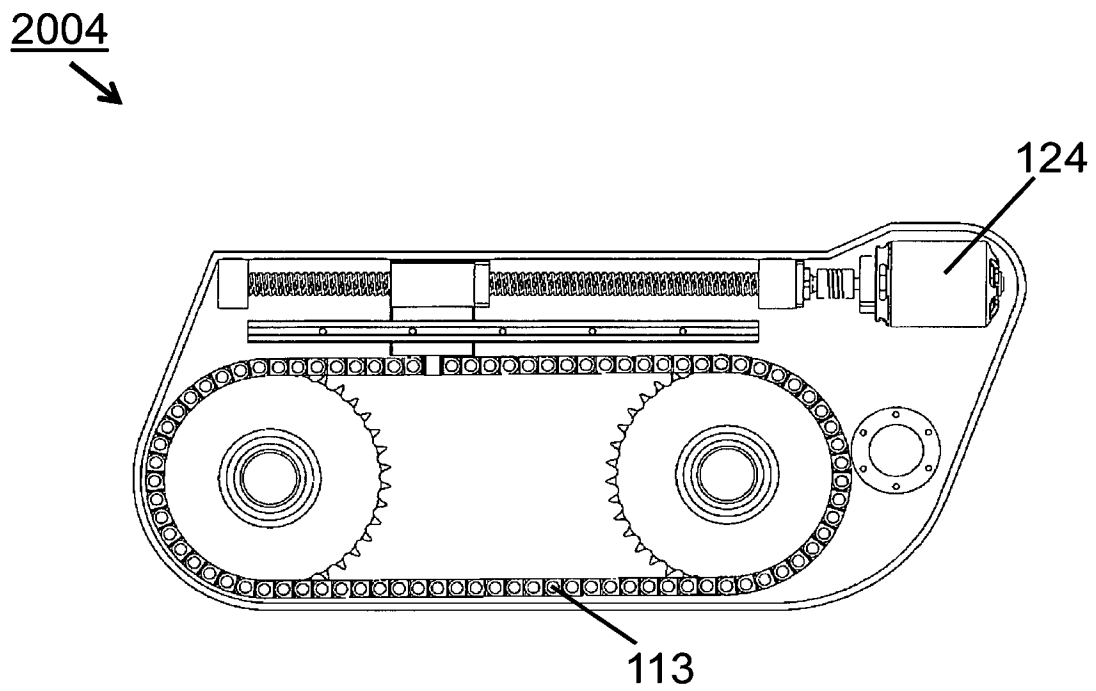
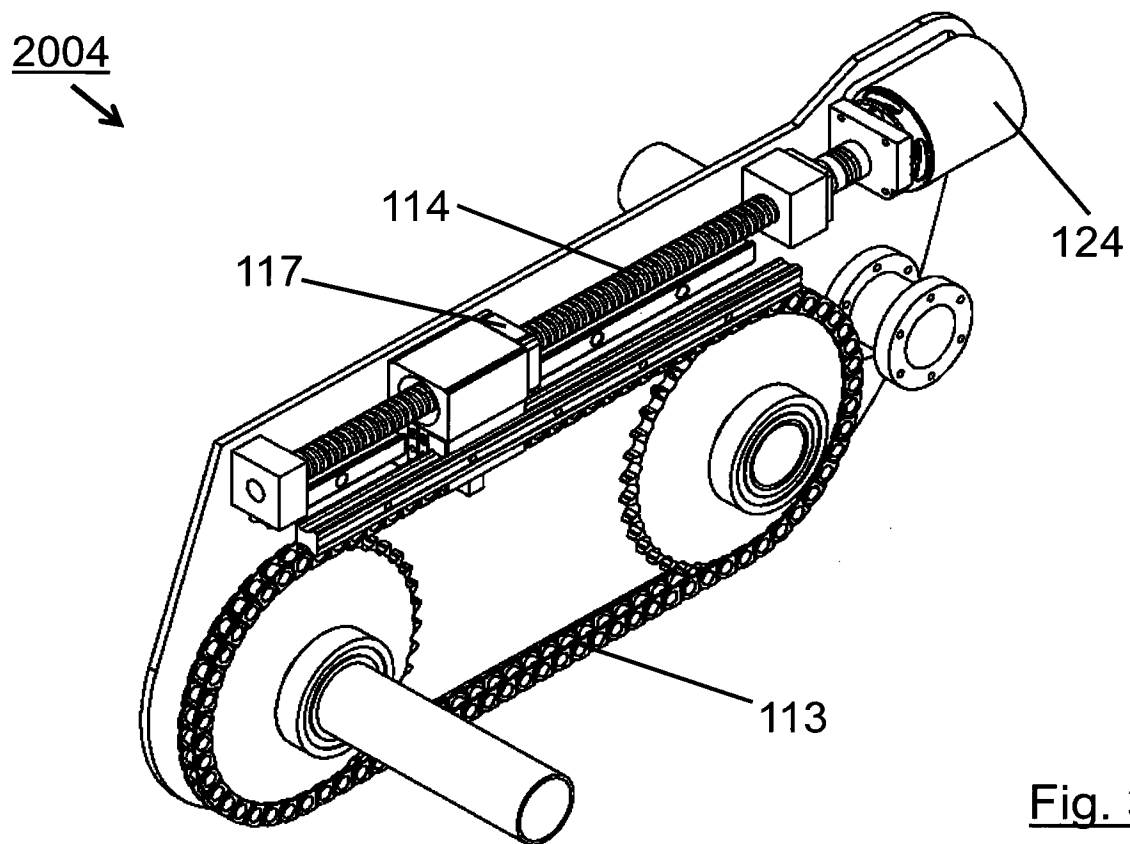


Fig. 37





2004  
↘

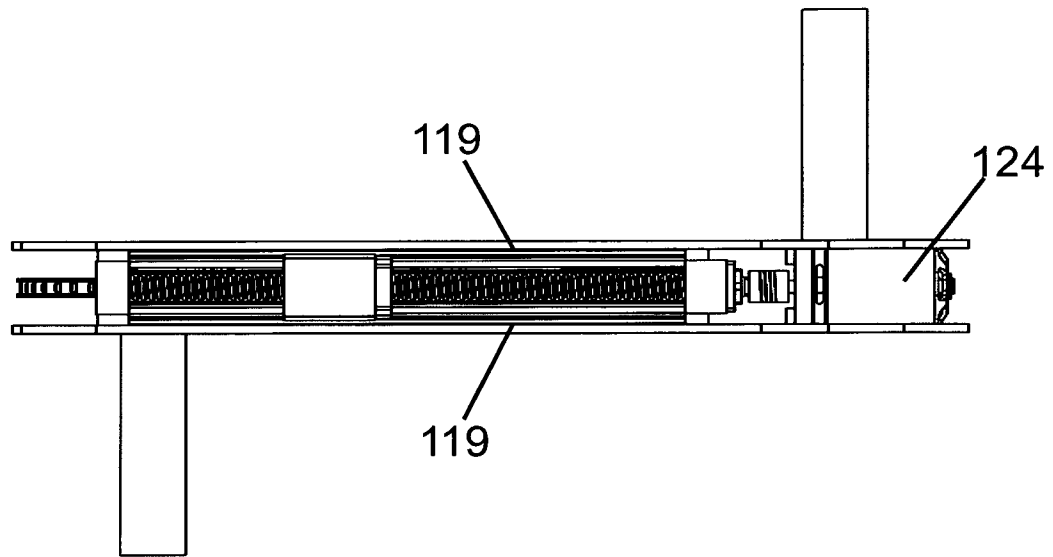


Fig. 40

2004'  
↘

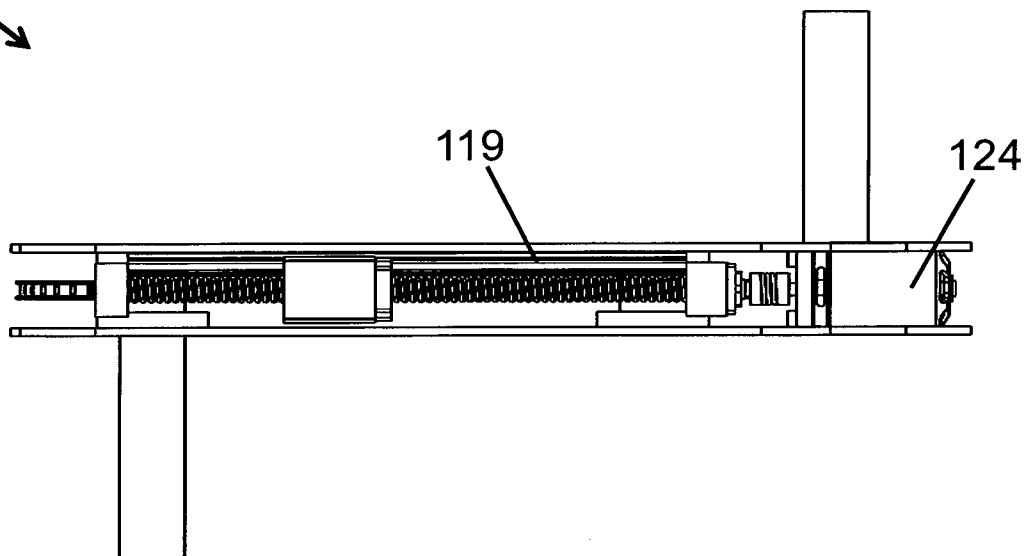
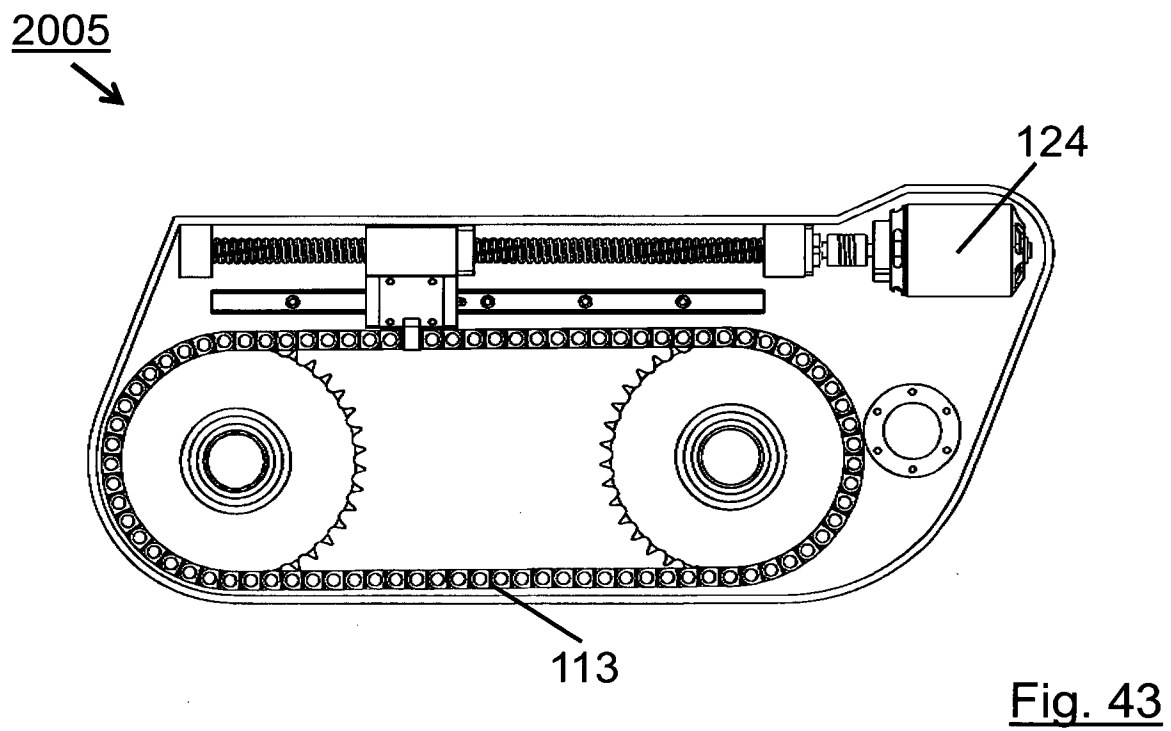
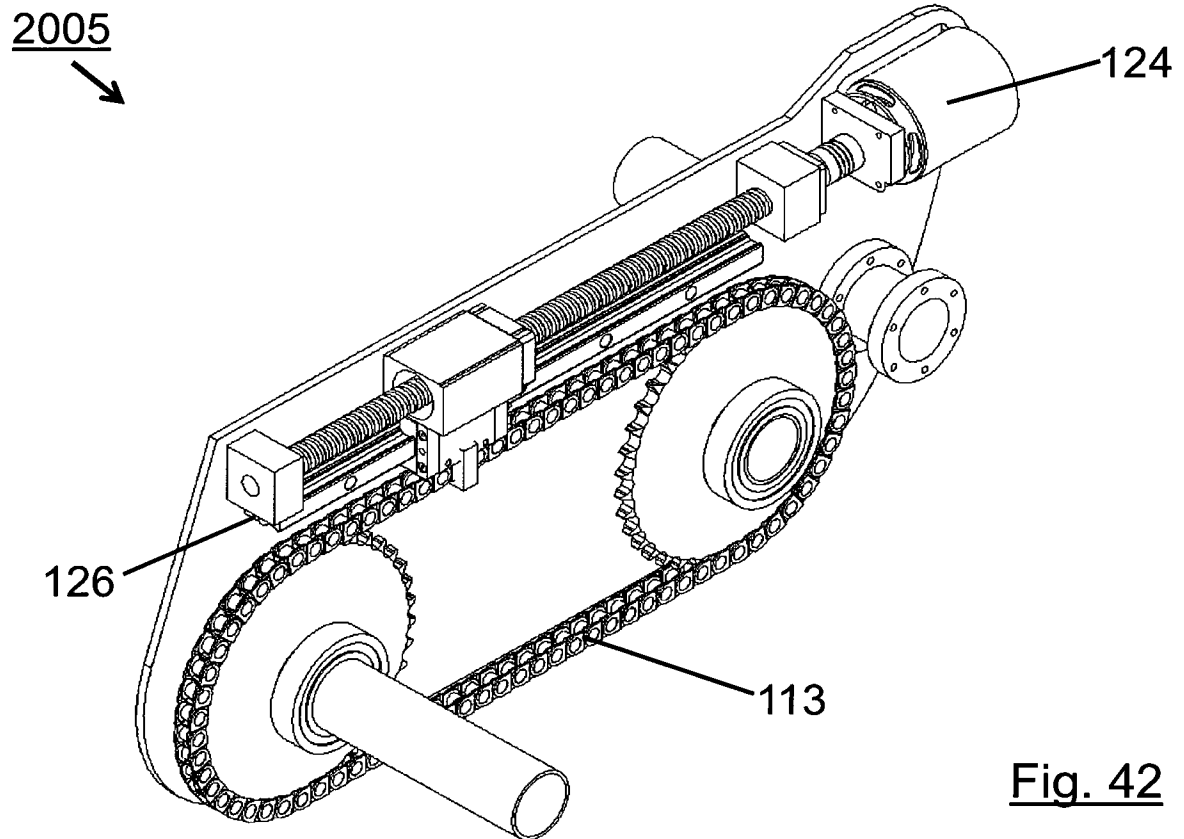
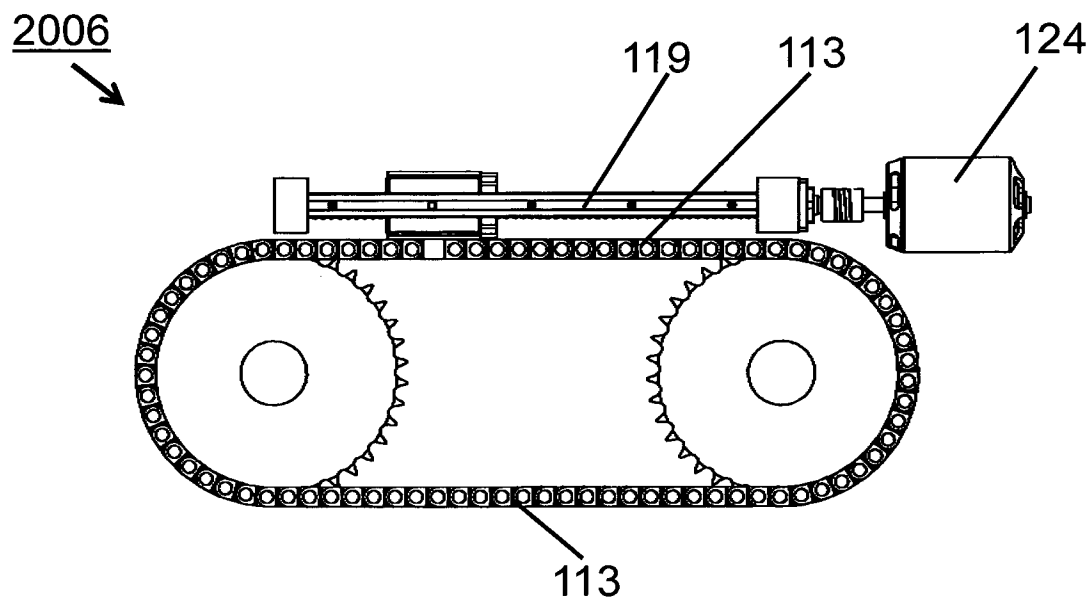
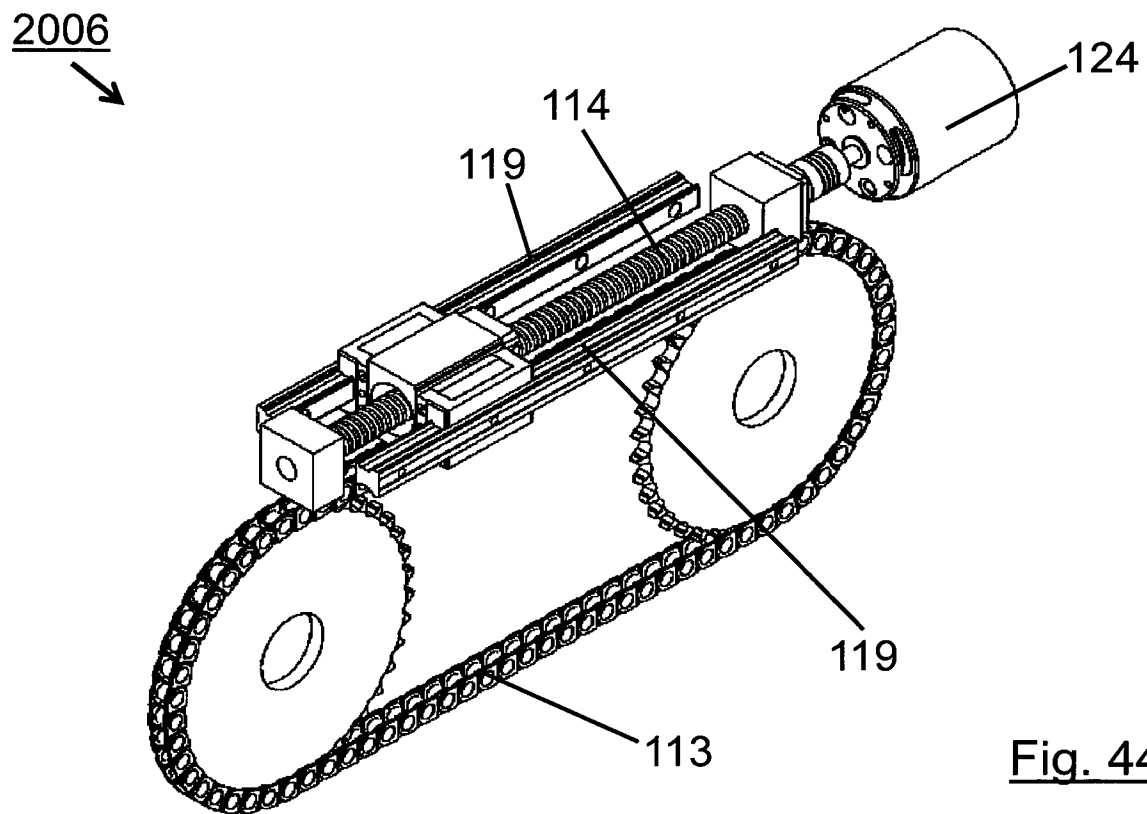


Fig. 41





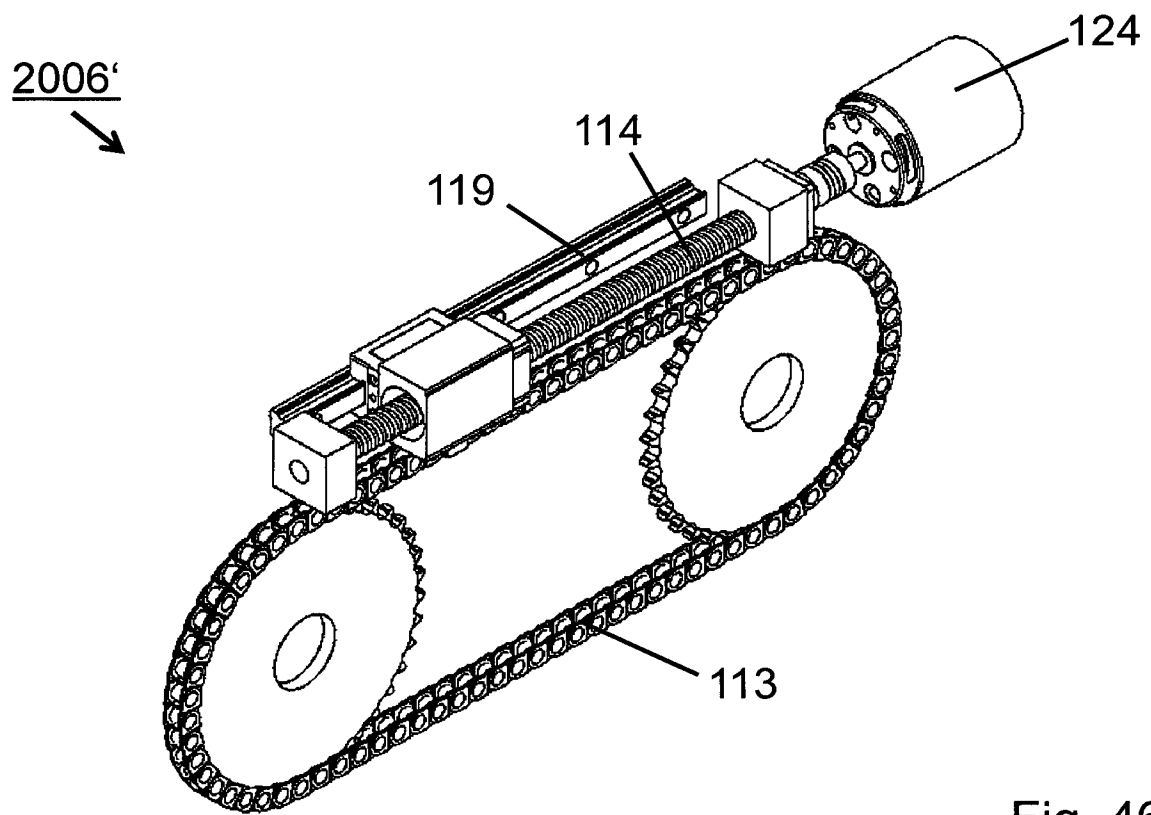


Fig. 46

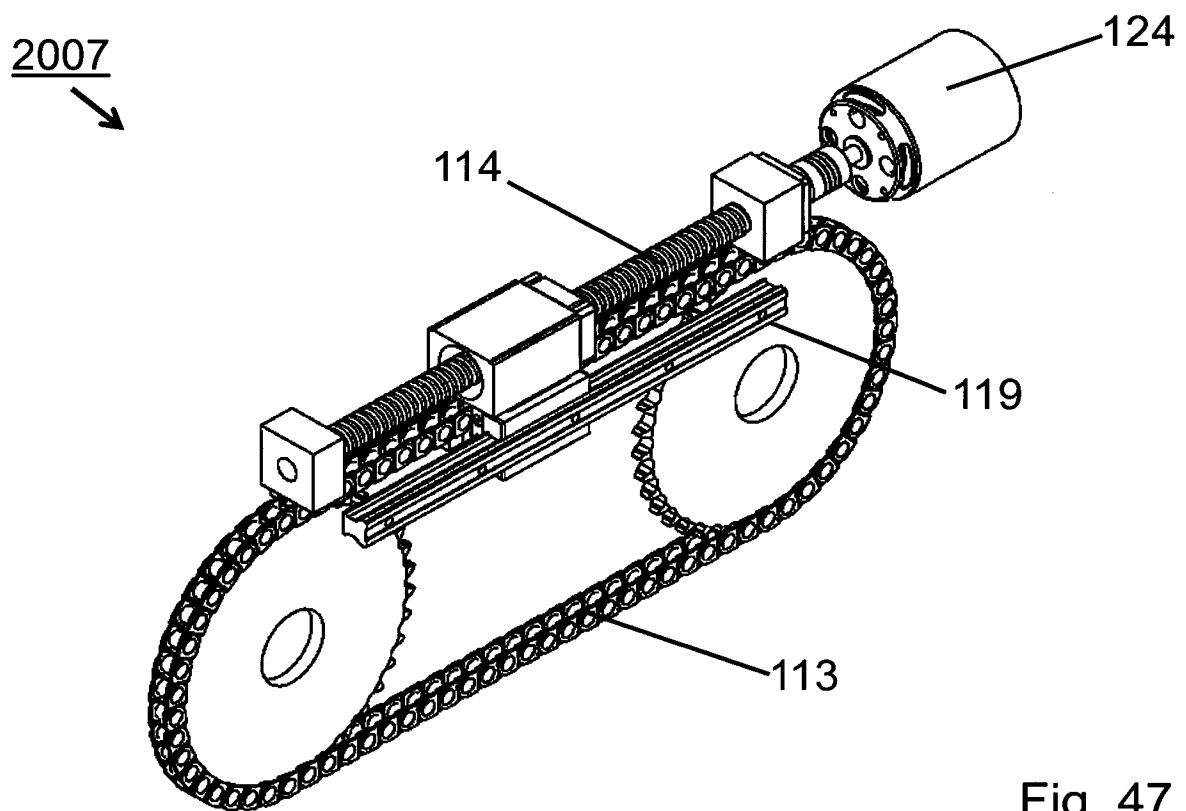


Fig. 47

2007  
↘

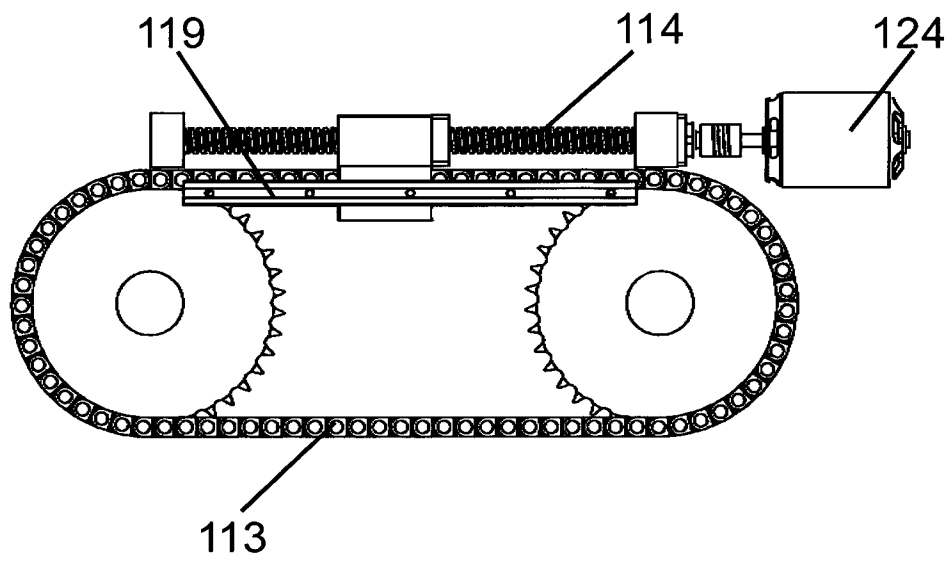


Fig. 48

2007'  
↘

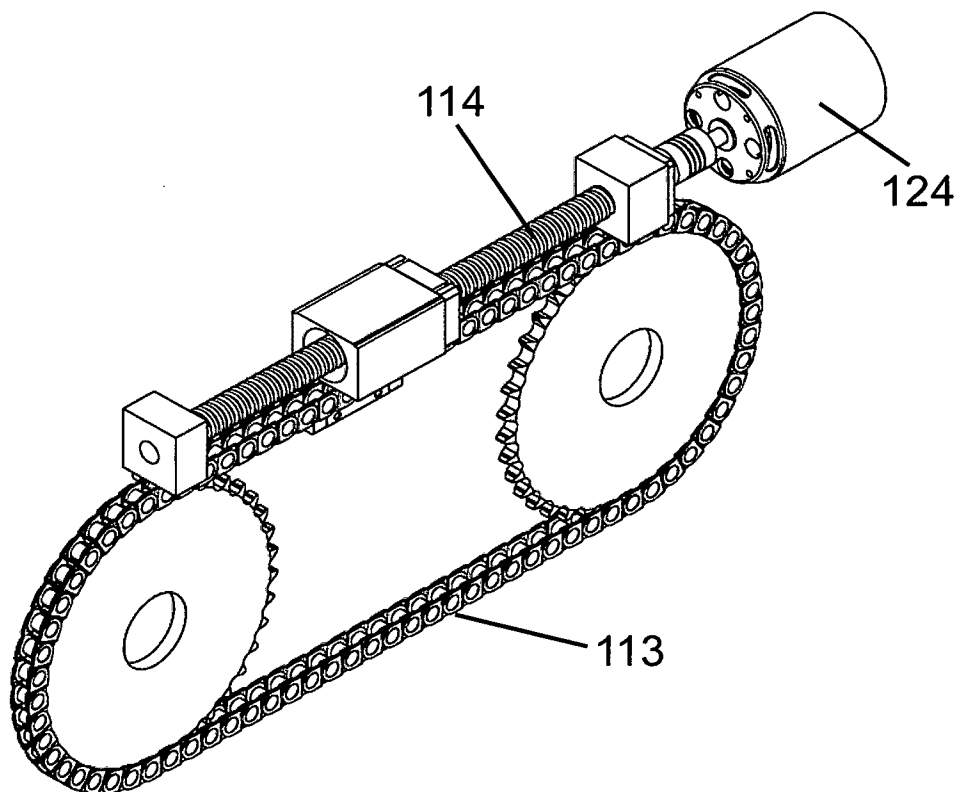
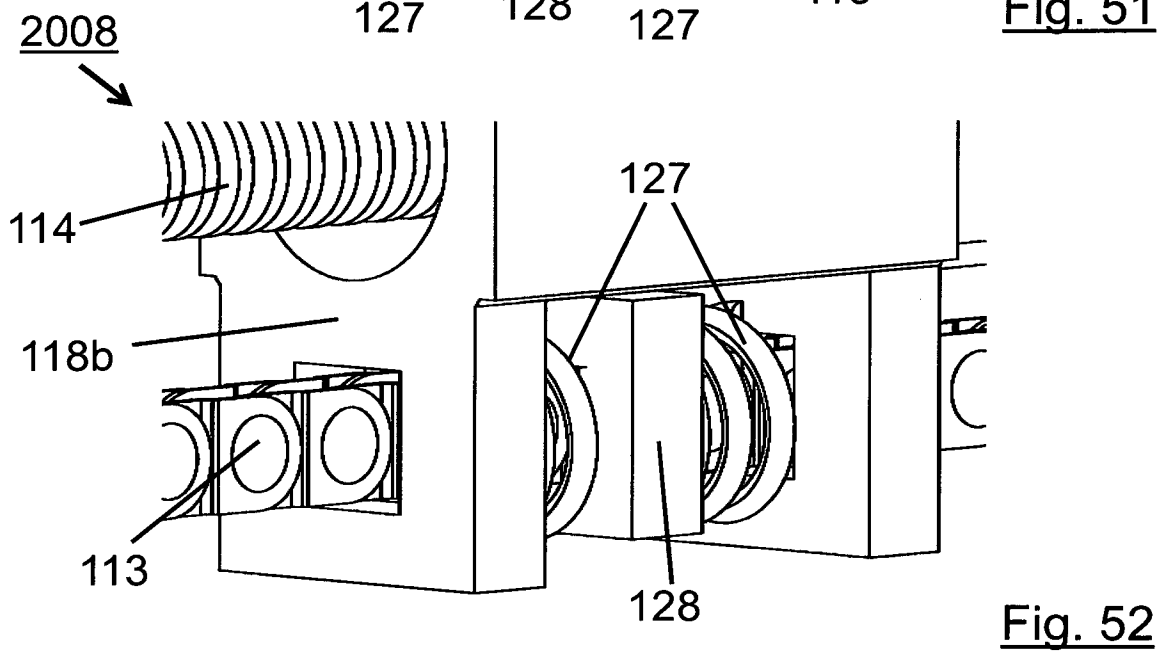
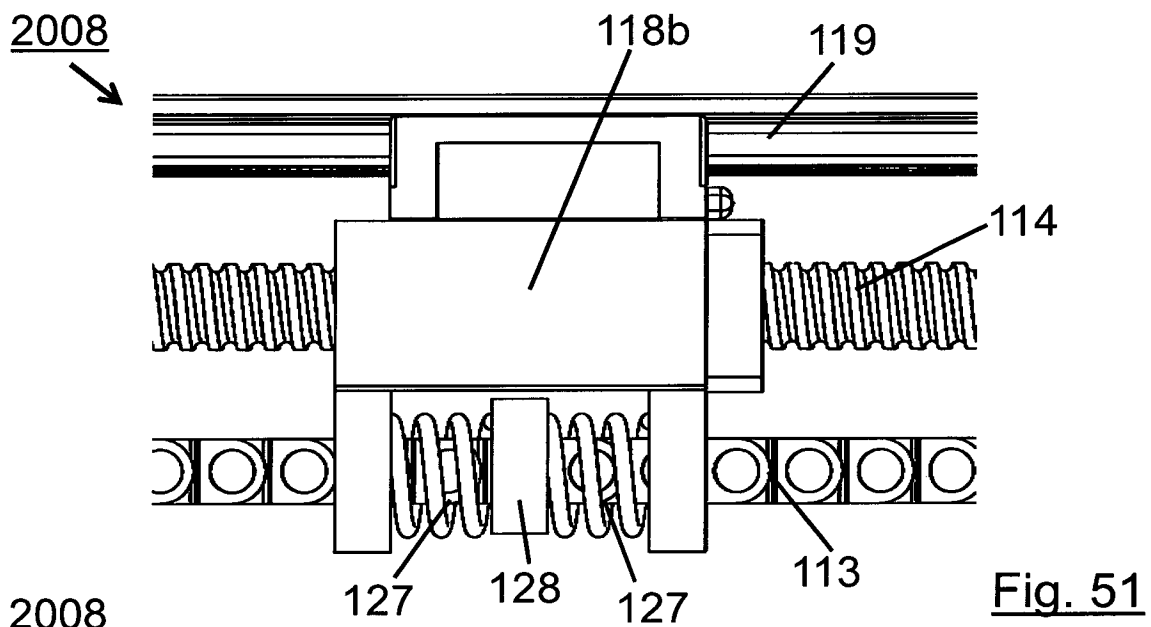
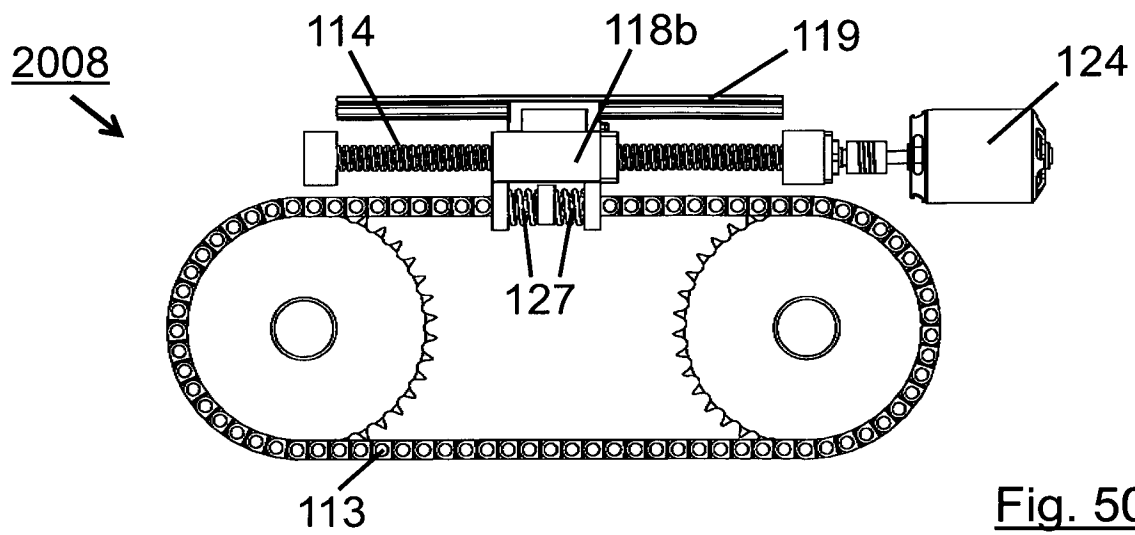


Fig. 49



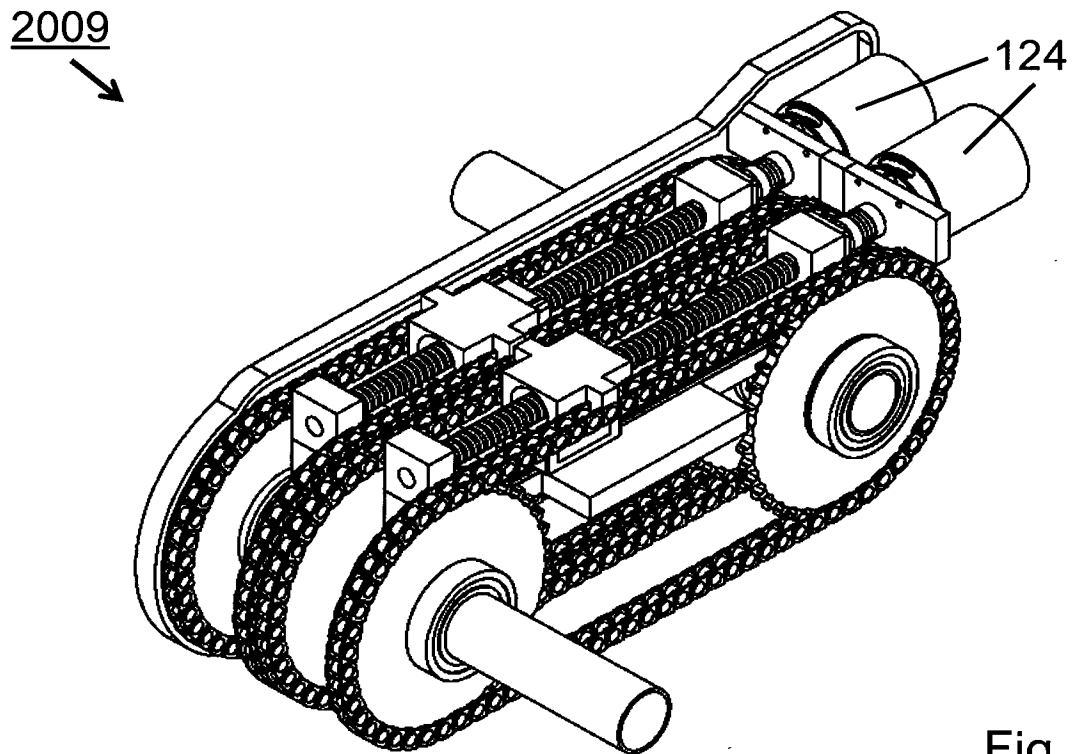


Fig. 53

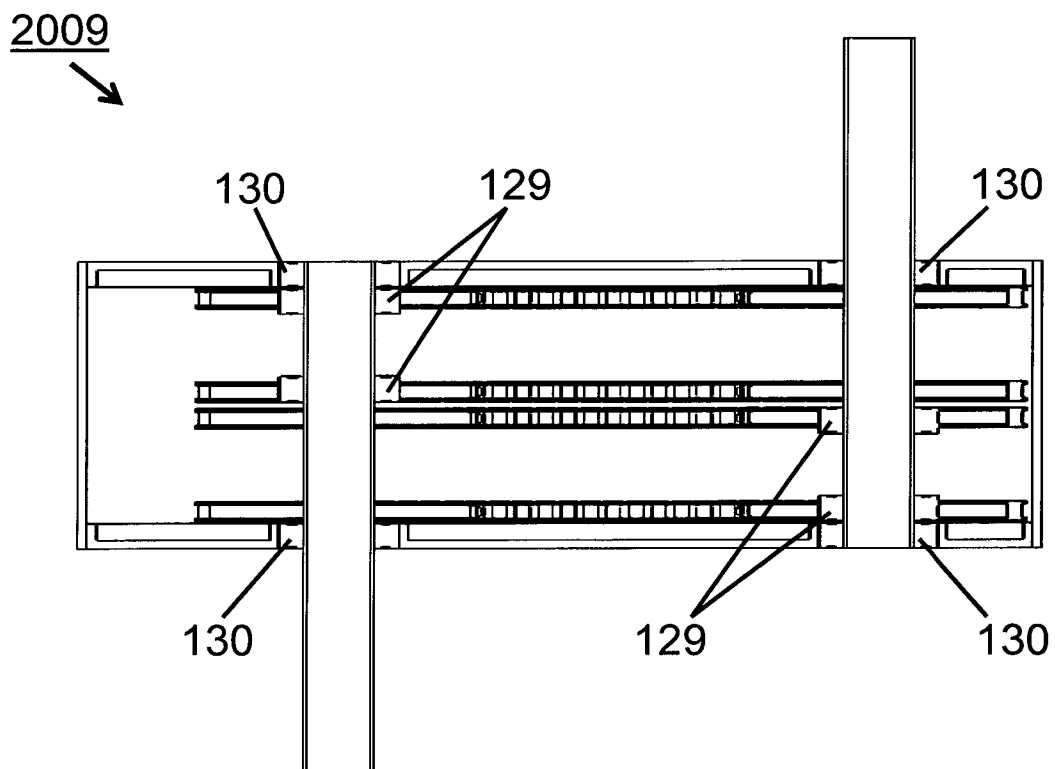


Fig. 54



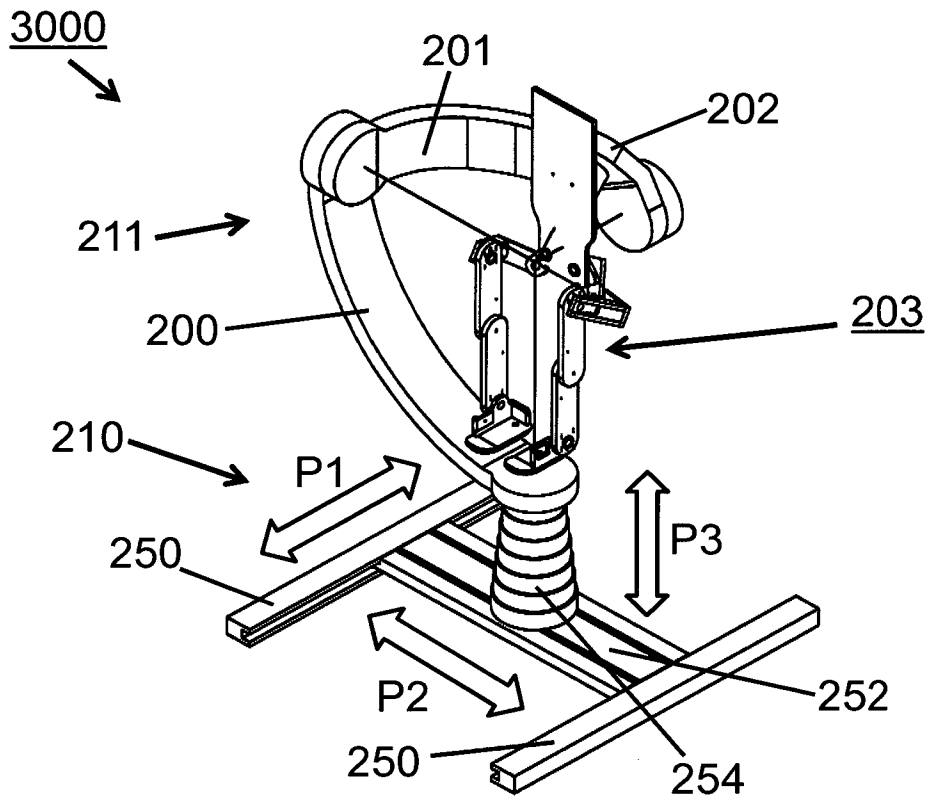


Fig. 55

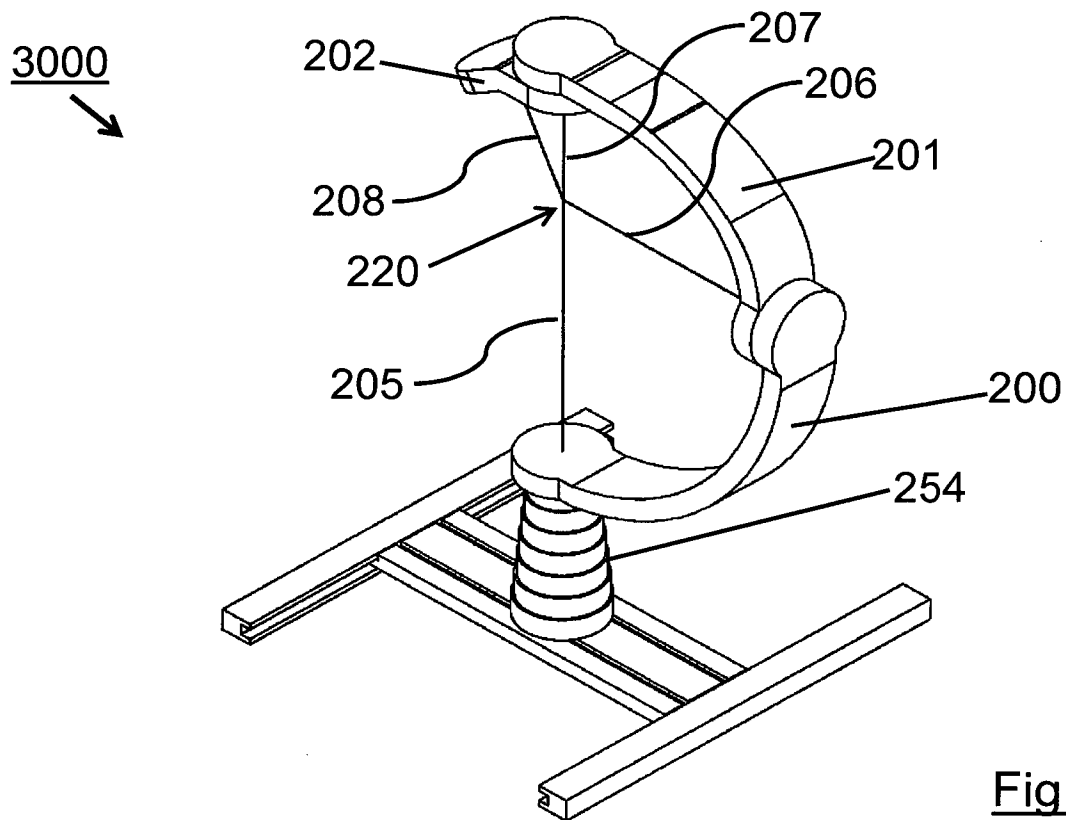


Fig. 56

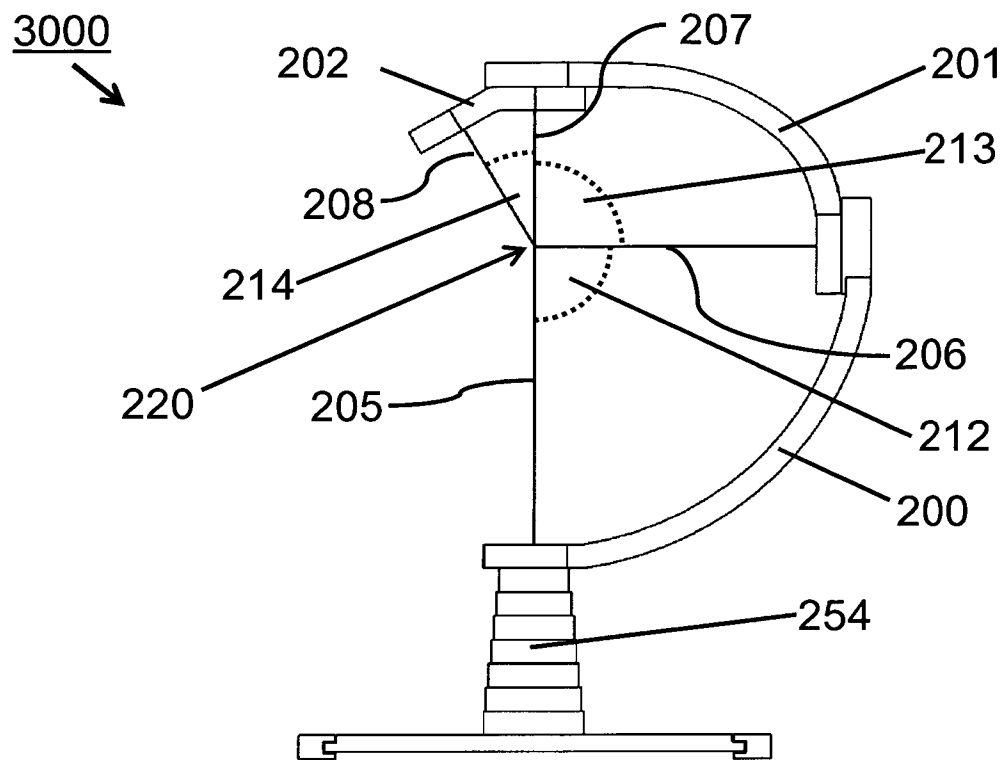


Fig. 57

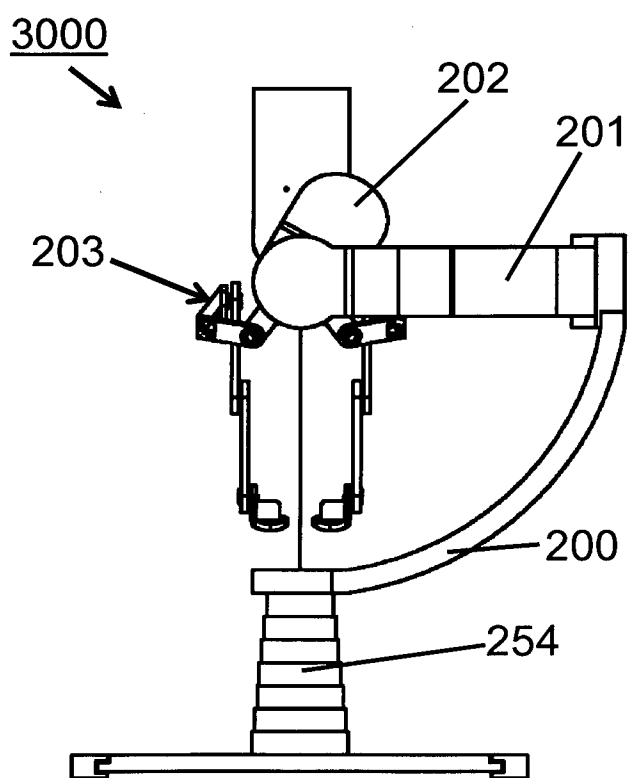


Fig. 58

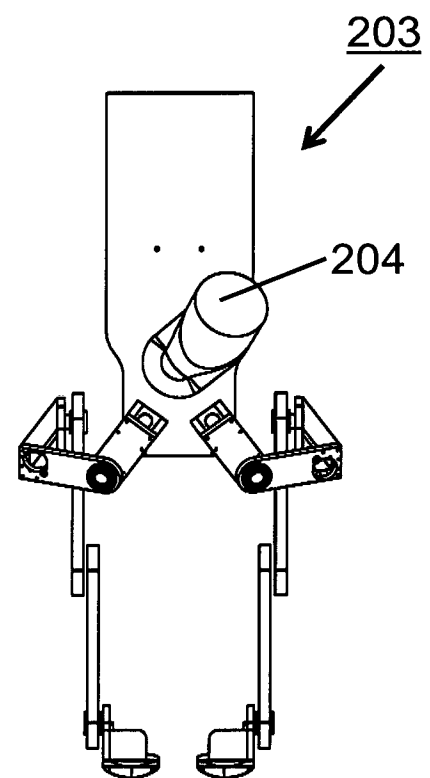


Fig. 59

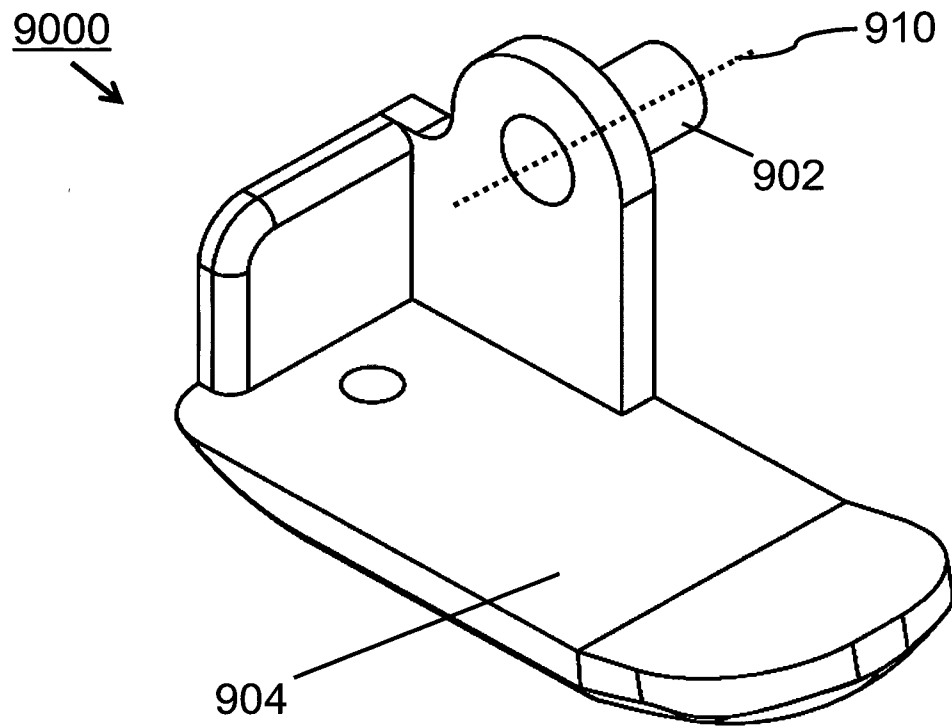


Fig. 60

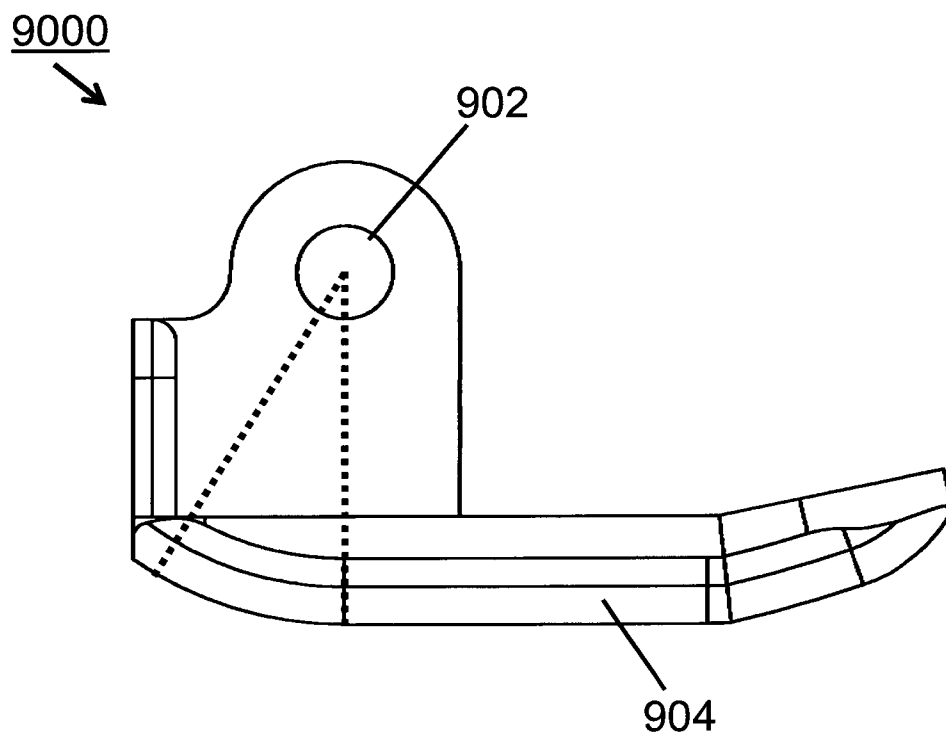


Fig. 61

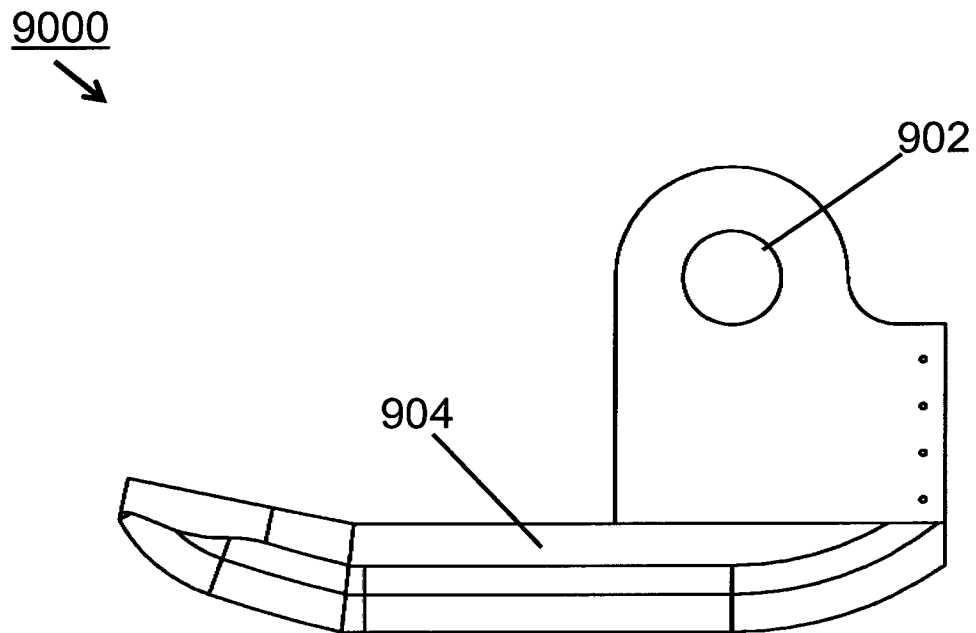


Fig. 62

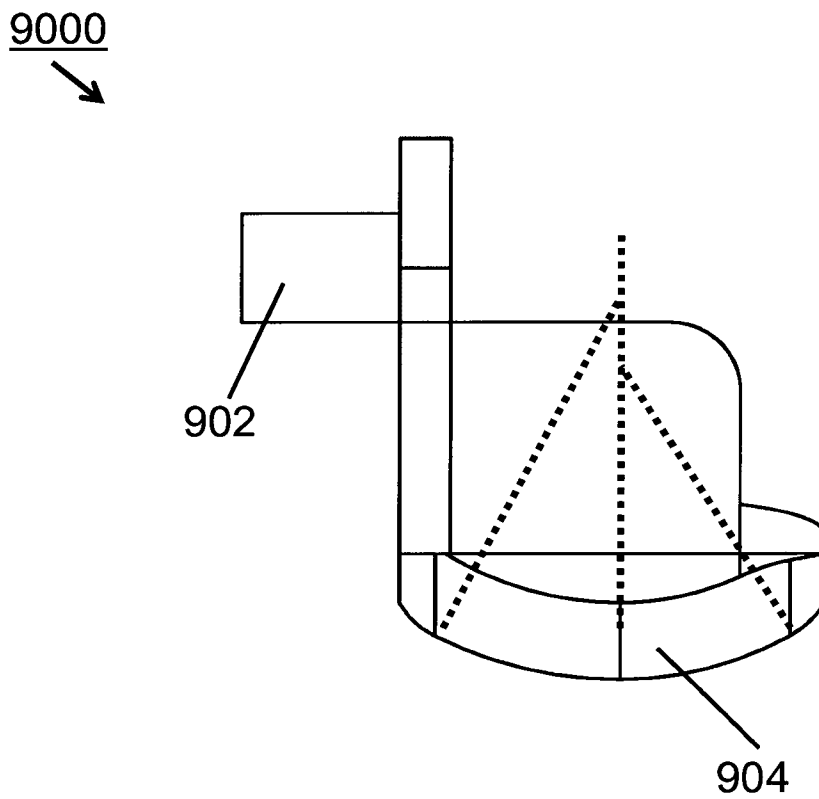


Fig. 63

