



(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2010 018 759.3**

(22) Anmeldetag: **29.04.2010**

(43) Offenlegungstag: **13.01.2011**

(51) Int Cl.<sup>8</sup>: **B25J 9/18** (2006.01)

(30) Unionspriorität:

**61/174,316**      **30.04.2009**      **US**  
**12/720,725**      **10.03.2010**      **US**

(74) Vertreter:

**Manitz, Finsterwald & Partner GbR, 80336  
München**

(71) Anmelder:

**GM Global Technology Operations, Inc., Detroit,  
Mich., US; The U.S.A. as Represented by the  
Administrator of the National Aeronautics and  
Space Administration, Washington, D.C., US**

(72) Erfinder:

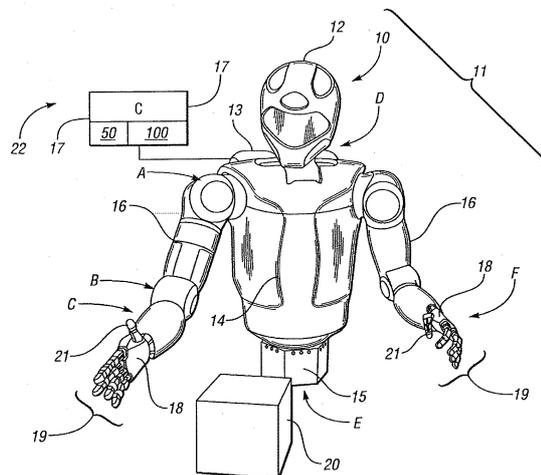
**Abdallah, Muhammad E., Houston, Tex., US; Platt  
Jr., Robert J., Cambridge, Mass., US; Wampler II,  
Charles W., Birmingham, Mich., US**

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

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

(54) Bezeichnung: **Spannungsverteilung in einem sehnengetriebenen Roboterfinger**

(57) Zusammenfassung: Es wird ein Verfahren bereitgestellt, um eine Spannung auf Sehnen eines sehnengetriebenen Fingers in einem Robotersystem zu verteilen, wobei der Finger durch  $n$  Freiheitsgrade und  $n + 1$  Sehnen gekennzeichnet ist. Das Verfahren umfasst, dass eine maximale funktionale Spannung und eine minimale funktionale Spannung jeder Sehne des Fingers bestimmt werden und dann ein Controller verwendet wird, um eine Spannung auf die Sehnen so zu verteilen, dass jeder Sehne ein Spannungswert zugeordnet wird, der kleiner als die maximale funktionale Spannung und größer oder gleich der minimalen funktionalen Spannung ist. Das Verfahren hält die minimale funktionale Spannung ein, während die interne Spannung in dem Robotersystem minimiert wird, und es hält die maximale funktionale Spannung ein, ohne eine gekoppelte Störung an den Gelenkmomenten einzuführen. Ein Robotersystem umfasst einen Roboter mit mindestens einem sehnengetriebenen Finger, der durch  $n$  Freiheitsgrade und  $n + 1$  Sehnen gekennzeichnet ist, und einen Controller mit einem Algorithmus zum Steuern der Sehnen wie vorstehend offengelegt.



**Beschreibung**

**[0001]** Diese Erfindung erfolgte mit Regierungsunterstützung unter dem NASA Space Act Agreement Nummer SAA-AT-07-003. Die Regierung kann gewisse Rechte an der Erfindung besitzen.

## QUERVERWEIS AUF VERWANDTE ANMELDUNGEN

**[0002]** Die vorliegende Anmeldung beansprucht den Nutzen und die Priorität der vorläufigen US-Anmeldung mit der Nummer 61/174,316, die am 30. April 2009 eingereicht wurde.

## TECHNISCHES GEBIET

**[0003]** Die vorliegende Erfindung betrifft die Spannungsverteilung in der Momentensteuerung eines sehnengetriebenen Manipulators.

## HINTERGRUND DER ERFINDUNG

**[0004]** Roboter sind automatisierte Einrichtungen, die zum Manipulieren von Objekten unter Verwendung einer Reihe von Gliedern in der Lage sind, welche wiederum über ein oder mehrere Robotergelenke verbunden sind. Jedes Gelenk in einem typischen Roboter stellt mindestens eine unabhängige Steuerungsvariable dar, d. h. einen Freiheitsgrad (DOF). Greiforgane, wie etwa Hände, Finger oder Daumen werden letztendlich betätigt, um eine vorliegende Aufgabe auszuführen, z. B. das Ergreifen eines Arbeitswerkzeugs oder eines Objekts. Daher kann eine präzise Bewegungssteuerung des Roboters durch die Ebene der Aufgabenbeschreibung organisiert sein, welche eine Steuerung auf Objektebene, Greiforganebene und Gelenkebene umfasst. Die verschiedenen Steuerungsebenen erreichen gemeinsam die benötigte Mobilität, Geschicklichkeit und arbeitsaufgabenbezogene Funktionalität des Roboters.

**[0005]** In Robotersystemen werden oft Sehnenübertragungssysteme verwendet, z. B. bei der Betätigung von Roboterfingern in Händen mit einem hohen Freiheitsgrad (DOF). Zur Kraftsteuerung eines gegebenen sehnengetriebenen Fingers müssen die gewünschten Momente am Finger in eine Spannung an den Sehnen umgesetzt werden. Da Sehnen nur Zugkräfte übertragen können, d. h. eine Zug-Zug-Anordnung, muss die Anzahl der Sehnen und die Anzahl der Stellglieder den DOF überschreiten, um eine vollständig bestimmte Steuerung des sehnengetriebenen Fingers zu erreichen. Um ein vollständig bestimmter Finger zu werden, braucht der Finger nur eine Sehne mehr als die Anzahl von DOF, was als eine  $n + 1$ -Anordnung bekannt ist.

**[0006]** Wenn ein gewünschter Satz von Gelenkmomenten gegeben ist, existiert ein unendlicher Satz von Lösungen für entsprechende Sehnenspannungen. Jedoch ist jede Lösung, die einer Sehne einen negativen Spannungswert zuordnet, physikalisch nicht gültig. Dies liegt an der in eine Richtung wirkenden Natur der Sehnen, d. h. Sehnen können einer Ausdehnung widerstehen, nicht aber einer Kompression. Für dieses Problem existierende Verfahren stellen Lösungen bereit, die sicherstellen, dass alle Sehnenspannungen größer oder gleich Null sind. Wenn jedoch obere Sättigungsgrenzen erreicht werden, z. B. wenn die Maximalspannungsgrenze der Hardware erreicht ist, kann es sein, dass die resultierenden Gelenkmomente nicht vorhersagbar werden und ein nicht gewünschtes Koppeln eingebracht wird.

## ZUSAMMENFASSUNG DER ERFINDUNG

**[0007]** Folglich werden hier ein Momentensteuerungsverfahren und -system zur Spannungsverteilung in einem von Sehnen getriebenen Roboter manipulator bereitgestellt. Das Verfahren ordnet jeder Sehne des Manipulators eine Spannung innerhalb einer unteren und oberen Grenze zu oder verteilt diese. Es hält die untere Grenze ein, während es die aufgebrachte interne Spannung minimiert. Gleichzeitig hält es die obere Grenze ein, während es die Kopplungseffekte einer Sättigung beseitigt. Somit wird eine gleichmäßige und vorhersagbare Momentensteuerung des Manipulators bereitgestellt.

**[0008]** Das Verfahren verteilt Spannung auf  $n + 1$ -Sehnen eines sehnengetriebenen Fingers in einem Robotersystem, wobei der Finger selbst durch  $n$  Freiheitsgrade gekennzeichnet ist. Das Verfahren umfasst, dass eine maximale und eine minimale funktionale Spannung jeder der  $n + 1$  Sehnen bestimmt wird und dass ein Controller verwendet wird, um Spannung automatisch auf die  $n + 1$  Sehnen zu verteilen. Jeder Sehne wird ein Spannungswert zugeordnet, der kleiner als ihre entsprechende maximale funktionale Spannung und größer oder gleich ihrer entsprechenden minimalen funktionalen Spannung ist.

**[0009]** Wenn die obere Grenze von einer Sehne überschritten wird, stellt das Verfahren eine lineare Skalierung der Gelenkmomente bereit, sodass die obere Grenze eingehalten wird. Diese lineare Skalierung ermöglicht eine Spannungssättigung ohne Koppelleffekte über die Gelenkmomente. Das Verfahren ordnet immer den minimalen Spannungswert zu, der gleich der unteren Grenze ist. Dies stellt sicher, dass die interne Spannung an der Struktur minimiert ist. Das Verfahren ist so gezeigt, dass es maximal eine Iteration der Lösung benötigt. Es zieht daher keinen iterativen Prozess mit offenem Ende nach sich, wie es die mathematische Natur des Problems andernfalls nach sich ziehen würde. Diese Eigenschaft ist für Echtzeitanwendungen wichtig.

**[0010]** Ein Robotersystem umfasst einen Roboter mit mindestens einem sehnengetriebenen Finger, der durch  $n$  Freiheitsgrade und  $n + 1$  Sehnen gekennzeichnet ist, und einen Controller mit einem Algorithmus zum Steuern der  $n + 1$  Sehnen. Der Algorithmus ist ausgelegt, um eine maximale und eine minimale funktionale Spannung jeder der  $n + 1$  Sehnen zu bestimmen und um eine Spannung automatisch auf die  $n + 1$  Sehnen zu verteilen, sodass jeder Sehne ein Spannungswert zugeordnet wird, der kleiner als ihre entsprechende maximale funktionale Spannung und größer oder gleich ihrer entsprechenden minimalen funktionalen Spannung ist.

**[0011]** Für den sehnengetriebenen Roboterfinger wird auch ein Controller bereitgestellt, wobei der Controller einen Algorithmus umfasst, der ausgelegt ist, um eine maximale und eine minimale funktionale Spannung jeder Sehne des sehnengetriebenen Fingers zu bestimmen und um eine Spannung automatisch auf die  $n + 1$  Sehnen zu verteilen, wie vorstehend angemerkt ist.

**[0012]** Die vorstehenden Merkmale und andere Merkmale und Vorteile der vorliegenden Erfindung ergeben sich leicht aus der folgenden genauen Beschreibung der besten Arten zum Ausführen der Erfindung, wenn sie in Verbindung mit den beiliegenden Zeichnungen gelesen wird.

#### KURZBESCHREIBUNG DER ZEICHNUNG

**[0013]** [Fig. 1](#) ist eine schematische Veranschaulichung eines Robotersystems gemäß der Erfindung;

**[0014]** [Fig. 2](#) ist eine Veranschaulichung eines sehnengetriebenen Fingers gemäß der vorliegenden Erfindung; und

**[0015]** [Fig. 3](#) ist ein Flussdiagramm, der einen Algorithmus beschreibt, der die jeder Sehne zugeordnete Spannung gemäß der vorliegenden Erfindung verteilt.

#### BESCHREIBUNG DER BEVORZUGTEN AUSFÜHRUNGSFORM

**[0016]** Mit Bezug auf die Zeichnungen, in denen gleiche Bezugszeichen in den verschiedenen Ansichten gleichen oder ähnlichen Komponenten entsprechen, und mit [Fig. 1](#) beginnend, ist ein Robotersystem **11** gezeigt, das einen Roboter **10** aufweist, z. B. einen geschickten humanoiden Roboter, wie gezeigt, oder einen beliebigen Teil davon, der über ein Steuerungssystem oder einen Controller (C) **22** gesteuert wird. Der Controller **22** umfasst einen Algorithmus **100** zum Steuern eines oder mehrerer sehnengetriebener Finger, wie nachstehend erläutert wird. Der Controller **22** ist mit dem Roboter **10** elektrisch verbunden und ist ausgelegt, um die verschiedenen Manipulatoren des Roboters **10** zu steuern, welche einen oder mehrere sehnengetriebene Finger **19** umfassen, wie nachstehend mit Bezug auf [Fig. 2](#) und [Fig. 3](#) im Detail beschrieben ist.

**[0017]** Der Roboter **10** ist zum Ausführen einer oder mehrerer automatisierter Aufgaben mit mehreren Freiheitsgraden (DOF) ausgelegt, und um andere interaktive Aufgaben auszuführen oder andere integrierte Systemkomponenten zu steuern, z. B. Einspannen, Beleuchten, Relais usw. Gemäß einer Ausführungsform ist der Roboter **10** wie gezeigt als ein humanoider Roboter mit über 42 DOF ausgestaltet, obwohl andere Roboterentwürfe, die weniger DOF aufweisen, und/oder nur eine Hand **18** mit mindestens einem sehnengetriebenen Finger **19** aufweisen, auch verwendet werden können, ohne den beabsichtigten Umfang der Erfindung zu verlassen. Der Roboter **10** von [Fig. 1](#) verfügt über eine Vielzahl unabhängig und abhängig voneinander bewegbarer Manipulatoren, z. B. die Hände **18**, Finger **19**, Daumen **21**, usw., welche verschiedene Robotergelenke umfassen. Die Gelenke können umfassen, sind aber nicht unbedingt beschränkt auf ein Schultergelenk, dessen Position allgemein durch Pfeil A angezeigt ist, ein Ellbogengelenk (Pfeil B), ein Handgelenk (Pfeil C), ein Halsgelenk (Pfeil D), und ein Hüftgelenk (Pfeil E) sowie die Fingergelenke (Pfeil F) zwischen den Gliedern jedes Roboterfingers.

**[0018]** Jedes Robotergelenk kann einen oder mehrere DOF aufweisen, was in Abhängigkeit von der Aufga-

benkomplexität variiert. Jedes Robotergelenk kann ein oder mehrere Stellglieder, z. B. Gelenkmotoren, lineare Stellglieder, rotatorische Stellglieder und dergleichen enthalten und intern dadurch angetrieben sein. Der Roboter **10** kann menschenähnliche Komponenten, wie etwa einen Kopf **12**, einen Torso **14**, eine Taille **15** und Arme **16** sowie die Hände **18**, Finger **19** und Daumen **21** umfassen, wobei die vorstehend angeführten verschiedenen Gelenke innerhalb oder zwischen diesen Komponenten angeordnet sind. Der Roboter **10** kann auch eine für die Aufgabe geeignete Halterung oder Basis (nicht gezeigt) umfassen, wie etwa Beine, Laufflächen oder eine andere bewegliche oder feste Basis in Abhängigkeit von der speziellen Anwendung oder der beabsichtigten Verwendung des Roboters. Eine Leistungsversorgung **13** kann an den Roboter **10** fest angebaut sein, z. B. ein wiederaufladbarer Batteriestapel, der auf dem Rücken des Torsos **14** mitgeführt oder getragen wird, oder eine andere geeignete Energiezufuhr, oder die entfernt durch ein Verbindungskabel angebracht ist, um genügend elektrische Energie für die verschiedenen Gelenke zur Bewegung derselben bereitzustellen.

**[0019]** Immer noch mit Bezug auf [Fig. 1](#) kann der Controller **22** mehrere digitale Computer oder Datenverarbeitungseinrichtungen umfassen, die jeweils einen oder mehrere Mikroprozessoren oder zentrale Verarbeitungseinheiten (CPU), einen Festwertspeicher (ROM), einen Speicher mit wahlfreiem Zugriff (RAM), einen löschbaren elektrisch programmierbaren Festwertspeicher (EEPROM), einen Hochgeschwindigkeitstaktgeber, Analog/Digital-Schaltungen (A/D-Schaltungen), Digital/Analog-Schaltungen (D/A-Schaltungen) und beliebige benötigte Eingabe/Ausgabe-Schaltungen (I/O-Schaltungen) und Einrichtungen sowie Signalaufbereitungs- und Pufferelektronik aufweisen. Einzelne Steuerungsalgorithmen, die im Controller **22** vorhanden oder für diesen leicht zugänglich sind, können im ROM gespeichert sein und automatisch bei einer oder mehreren verschiedenen Steuerungsebenen ausgeführt werden, um die jeweilige Steuerungsfunktionalität bereitzustellen.

**[0020]** Der Controller **22** kann einen Server oder eine Host-Maschine **17** umfassen, der bzw. die als ein verteiltes oder zentrales Steuerungsmodul ausgestaltet ist und Steuerungsmodule und Fähigkeiten derart aufweist, wie es notwendig sein kann, um alle geforderten Steuerungsfunktionalitäten des Roboters **10** auf die gewünschte Weise auszuführen. Zudem kann der Controller **22** als ein universeller digitaler Computer ausgestaltet sein, der allgemein einen Mikroprozessor oder eine zentrale Verarbeitungseinheit, einen Festwertspeicher (ROM), einen Speicher mit wahlfreiem Zugriff (RAM), einen elektrisch löschbaren programmierbaren Festwertspeicher (EEPROM), einen Hochgeschwindigkeitstaktgeber, Analog/Digital-Schaltungen (A/D-Schaltungen) und Digital/Analog-Schaltungen (D/A-Schaltungen) und Eingabe/Ausgabe-Schaltungen und Einrichtungen (I/O-Schaltungen) sowie geeignete Signalaufbereitungs- und Pufferschaltungen umfasst. Beliebige Algorithmen, die im Controller **22** vorhanden oder für diesen zugänglich sind, welche einen Algorithmus **100** zur Verteilung von Spannung auf Sehnen eines Manipulators wie nachstehend erläutert, z. B. einen Finger **19**, und eine Sehnenabbildung **50** wie nachstehend erläutert umfassen, können im ROM gespeichert sein und nach Bedarf zugänglich sein und ausgeführt werden, um die jeweilige Funktionalität bereitzustellen.

**[0021]** Mit Bezug auf [Fig. 2](#) kann ein sehnengetriebener Finger **19** mit dem Roboter **10** von [Fig. 1](#) oder mit einem beliebigen anderen Roboter verwendet werden, der die Anwendung einer Greifkraft auf ein Objekt benötigt. Bei der Momentensteuerung von sehnengetriebenen Fingern müssen die gewünschten Gelenkmomente zuerst in Sehnenspannungen umgesetzt werden. Dieses Problem wird als Spannungsverteilung bezeichnet und sie muss sicherstellen, dass jeder Spannungswert nicht negativ ist. Die vorliegende Erfindung stellt sicher, dass jede Spannung in einen begrenzten Bereich  $[f_{\min}, f_{\max}]$  fällt, wobei  $f_{\min} \geq 0$ . Sie setzt den niedrigsten Spannungswert gleich  $f_{\min}$  und minimiert somit die interne Spannung. Immer, wenn der höchste Spannungswert  $f_{\max}$  überschreitet, löst sie nach der linearen Skalierung der Momente auf, die benötigt werden, um die Grenzen einzuhalten, während die interne Spannung minimiert wird.

**[0022]** Der Finger **19** enthält Sehnen **34** und eine Vielzahl von Gelenken **32**, von denen einige unabhängige Gelenke sind, die durch Pfeile  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  und  $\tau_3$  angezeigt sind. Der Finger **19** weist  $n$  unabhängige Gelenke ( $n$ DOF) und  $n + 1$  Sehnen **34** auf. Der in [Fig. 2](#) gezeigte Finger **19** weist drei DOF auf, daher ist die Anzahl der Sehnen bei dieser speziellen Ausführungsform = 4, obwohl mehr oder weniger Sehnen und/oder DOF ebenfalls verwendet werden können, ohne den beabsichtigten erfinderischen Umfang zu verlassen. Es wird angemerkt, dass das distale Gelenk mit dem benachbarten Gelenk mechanisch gekoppelt ist, d. h. mit dem mittleren Gelenk; das distale Gelenk ist daher kein unabhängiger DOF. Auch ist die Steuerung des Fingers **19** vollständig bestimmt, so wie dieser Ausdruck in der Technik verstanden wird, und daher trägt die Anzahl von Sehnen **34** bei der in [Fig. 2](#) gezeigten speziellen Ausführungsform  $n + 1$  oder 4. Wie vorstehend angegeben, ist jedes unabhängige Gelenk **32** durch ein Gelenkmoment  $\tau$  gekennzeichnet. Jede der  $n$  Sehnen **34** ist durch eine Spannung  $f$  gekennzeichnet, die in [Fig. 2](#) als  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$  und  $f_4$  oder allgemein als  $f_1$  bis  $f_{n+1}$  dargestellt sind.

**[0023]** Für einen sehnengetriebenen Finger **19** mit  $n$  Freiheitsgraden und  $n + 1$  Sehnen **34** wird die Momen-

tensteuerungsstrategie durch einen Algorithmus **100** bestimmt, welcher eine Spannung automatisch auf die  $n + 1$  Sehnen derart verteilt, dass jeder jeweiligen Sehne eine jeweilige Spannung  $f_1$  bis  $f_{n+1}$  zugeordnet wird, die kleiner als die maximale funktionale Spannung  $f_{\max}$  und größer oder gleich der minimalen funktionalen Spannung  $f_{\min}$  ist. Die Spannungen  $f_1$  bis  $f_{n+1}$  werden innerhalb des Bereichs  $[f_{\min}, f_{\max}]$  zugeteilt, indem die Gelenkmomente falls notwendig linear skaliert werden.

**[0024]** Daher wird bei dem sehnengetriebenen Finger **19** der Vektor der Sehnen Spannungen  $f$  derart zugeteilt, dass jede Spannung  $f_1$  bis  $f_{n+1}$  in den Bereich  $[f_{\min}, f_{\max}]$  fällt. Aufgrund der in eine Richtung gerichteten Natur der Sehnen **34** ist  $f_{\min} \geq 0$ . Die Beziehung zwischen den  $n$  Gelenkmomenten  $\tau$  und den  $n + 1$  Sehnen Spannungen  $f_1$  bis  $f_{n+1}$  ist:

$$f \in \mathcal{R}^{n+1 \times n}$$

wobei  $t$  als die interne Spannung definiert ist.  $R \in \mathcal{R}^{n \times n+1}$  ist die Sehnenabbildung **50**, die in [Fig. 1](#) schematisch gezeigt ist, welche die Gelenkradiusdaten enthält, die Sehnen Spannungen  $f$  in Gelenkmomente  $\tau$  abbildet.  $w$  ist eine Matrix mit  $n + 1$  Zeilen, die nicht im Bereichsraum von  $R$  liegt. Es ist zu beachten, dass die Sehnenabbildung ( $R$ ) **50** einen vollständig positiven Nullraum aufweisen muss, damit das System durch Sehnen steuerbar ist. Die "interne Spannung" ist daher eine gewichtete Summe aller Spannungen; folglich zeigt eine kleinere interne Spannung kleinere Spannungen zwischen den Sehnen und eine kleinere Nettokraft an der Struktur an.

**[0025]** Die Inverse der Sehnen transformation in (1) kann wie folgt unterteilt werden:

$$R \in \mathcal{R}^{n \times n+1}$$

**[0026]**  $A = (\in \mathcal{R}^{n+1 \times n})$  und  $a = (\in \mathcal{R}^{n+1 \times n})$  sind Konstanten, die vorausberechnet werden können und als kalibrierte Werte gespeichert werden können und  $w$  wird so gewählt, dass sie orthogonal zu  $R$  ist ( $Rw^T = 0$ ). Unter dieser Bedingung:

$$A = R^+, a = w^+ \quad (3)$$

**[0027]** Die Hochstellung ( $^+$ ) zeigt die Pseudoinverse an. Wie angemerkt, muss der Nullraum der Sehnen transformation ein positiver Vektor sein.  $a$  ist somit auch immer positiv, da die Pseudoinverse eines positiven Vektors auch positiv ist.

**[0028]** Mit Bezug auf [Fig. 3](#) kann ein Algorithmus **100** von dem Controller **22** von [Fig. 1](#) ausgeführt werden, um die Steuerungsstrategie der vorliegenden Erfindung bereitzustellen. Der Algorithmus **100** beginnt bei Schritt **102**, bei dem die Gelenkmomente und Spannungsgrenzen des Fingers **19** bestimmt und als ein Satz von Eingängen an den Algorithmus **100** bereitgestellt werden. Nach der Bereitstellung geht der Algorithmus zu Schritt **104** weiter und der Controller **22** berechnet die minimale interne Spannung des Fingers **19**. Schritt **104** erfordert die Verteilung der Spannungen  $f_1$  bis  $f_{n+1}$  derart, dass der minimale Wert gleich  $f_{\min}$  ist. In Gleichung (4) nachstehend stellt  $A_i$  die  $i$ -te Zeile von  $A$  dar und  $a_i$  die  $i$ -te Zeile von  $a$ , wobei  $a_i$  alle positive Elemente sind:

$$f_i = A_i \tau + a_i t \geq f_{\min} \quad (4)$$

**[0029]** Dies liefert die folgende Lösung für die interne Spannung  $t_0$ :

$$t_0 = \max_i \frac{f_{\min} - A_i \tau}{a_i} \quad (5)$$

**[0030]** Weitergehend zu Schritt **106** wird der interne Spannungswert  $t_0$  dann in die Gleichung (2) für die Spannungsverteilung substituiert, d. h.:

$$f = [A \ a] \begin{pmatrix} \tau \\ t_0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

**[0031]** Danach bestimmt der Controller **22**, ob irgendeiner der Spannungswerte  $f_1$  bis  $f_{n+1}$  die obere Grenze  $f_{\max}$  überschreitet. Wenn keiner der Spannungswerte  $f_1$  bis  $f_{n+1}$  die obere Grenze  $f_{\max}$  überschreitet, geht der Algorithmus **100** zu Schritt **108** weiter, die Spannungswerte  $f_1$  bis  $f_{n+1}$  werden ihren jeweiligen Sehnen **34** zugeordnet und der Algorithmus **100** ist beendet. Wenn bei Schritt **106** ermittelt wird, dass irgendeiner der Spannungswerte  $f_1$  bis  $f_{n+1}$  die obere Grenze  $f_{\max}$  überschreitet, geht der Algorithmus zu Schritt **110** weiter, bei dem eine skalierte Lösung berechnet wird.  $i$  sei das Element mit der minimalen Spannung und  $j$  sei das Element mit der maximalen Spannung. Unter der Annahme, dass  $f_j > f_{\max}$  werden die Momente linear skaliert:

$$f = [A \ a] \begin{pmatrix} \alpha \tau \\ t \end{pmatrix} \quad (7)$$

und es wird die Lösung gefunden, bei der  $f_i = f_{\min}$  und  $f_j = f_{\max}$ .  $\alpha$  ist ein positiver Skalar. Die exakte Lösung folgt:

$$d = (\alpha_j A_i - \alpha_i A_j) \tau$$

$$\alpha = \frac{\alpha_j f_{\min} - \alpha_i f_{\max}}{d} \quad (8)$$

$$t = \frac{f_{\max} A_i - f_{\min} A_j}{d} \tau$$

**[0032]** Diese Lösung garantiert unter zwei Bedingungen, dass  $f \in [f_{\min}, f_{\max}]$ : wenn  $f_{\min} = 0$  oder der Finger **19** eine ausgeglichene Konfiguration aufweist. Ein Finger mit einer ausgeglichenen Konfiguration zeigt keine Nettomomente, wenn die Spannungen alle gleich sind (sodass die Elemente von  $w$  alle gleich sind). In einem dieser zwei Fälle kann der Algorithmus unmittelbar zu Schritt **108** weitergehen und enden. Andernfalls garantiert die Lösung nicht, dass alle Elemente innerhalb der gewünschten Grenzen liegen, und die Ergebnisse müssen mit der Möglichkeit einer zweiten Iteration überprüft werden. Wenn keiner Spannungswerte  $f_1$  bis  $f_{n+1}$  die obere Grenze  $f_{\max}$  überschreitet, dann werden die Spannungswerte  $f_1$  bis  $f_{n+1}$  bei Schritt **114** ihren jeweiligen Sehnen **34** zugeordnet.

**[0033]** Wenn irgendeiner der Spannungswerte  $f_1$  bis  $f_{n+1}$  bei Schritt **112** die obere Grenze  $f_{\max}$  überschreitet, dann wird bei Schritt **116** die vorstehende Gleichung (8) iteriert, nachdem der Index  $i$  bzw.  $j$  dem neuen Extrelement zugeordnet wurde. Aufgrund des Wesens der Sehnentransformation sollte der Bedarf zum Iterieren nur selten auftreten. Beispielsweise kann er bei einem typischen Entwurf bei weniger als 2% der befohlenen Momentwerte auftreten. Zudem ist eine zweite Iteration effektiv ausreichend, um die zuzuordnenden Spannungswerte vollständig zu bestimmen, und der Algorithmus kann bei dieser Iteration gekappt werden.

**[0034]** Vorteile der vorliegenden Erfindung liegen bei mindestens zwei Schlüsselpunkten. Erstens tritt die Verteilung von Sehnenspannungen mit einem recheneffizienten Algorithmus auf, d. h. dem Algorithmus **100**, der keine lineare Programmierung benötigt. Zweitens wird die maximale Spannung mit einer linearen Skalierung der gewünschten Gelenkmomente gekappt oder begrenzt, wodurch die Kopplung und die gekoppelten Störungen beseitigt werden, die gewöhnlich durch eine Sättigung verursacht werden, was eine gleichmäßige und lineare Momentsteuerung erzeugt. Dies steht im Gegensatz zu herkömmlichen Verfahren, welche Spannungen aufweisen, die mechanisch gesättigt werden, um gekoppelte und nicht vorhersagbare Momente zu erzeugen. Zusätzlich setzt der Algorithmus **100** die niedrigste Spannung gleich der unteren Grenze oder Begrenzung, wodurch die interne Spannung minimiert wird.

**[0035]** Die aus Gleichung (8) resultierende skalierte Lösung schiebt nur selten ein anderes Element über die Grenzen hinaus, das heißt über  $f_{\max}$ . Dieses Ergebnis kann auch analytisch auf der Grundlage der Natur von  $R$  erläutert werden. Zuerst wird angemerkt, dass  $\alpha$  ein Skalar ist, sodass  $\alpha \in (0, 1)$ . Das Ergebnis ist intuitiv und der Beweis folgt. Die Lösung für  $\alpha$  in (8) wird betrachtet. Da  $f_i = f_{\min}$  und  $f_j > f_{\max}$ :

$$f_i x = A_i \tau + \alpha t_0$$

$$f_{\max} < A_j \tau + \alpha t_0 \quad (9)$$

**[0036]** Das Substituieren in Gleichung (8) zeigt, dass  $\alpha < 1$ . Gleichzeitig ist es trivial zu zeigen, dass  $\alpha > 0$ .

**[0037]** Die Parameter  $({}^0f, t_0)$  sollen die anfängliche Gleichung (6) bezeichnen, während  $({}^1f, t_1)$  die erste Iteration der skalierten Lösung für Gleichung (8) bezeichnen soll. Es kann gezeigt werden, dass die zwei Lösungen wie folgt in Verbindung stehen. Zur Erinnerung bezeichnen  $i$  und  $j$  die Elemente mit den niedrigsten bzw. höchsten Werten:

$${}^1f = \alpha {}^0f + \frac{(1 - \alpha)f_{\min}}{\alpha_i} \alpha \quad (10)$$

**[0038]** Der erste Ausdruck auf der rechten Seite ist der linear skalierte Abschnitt des Ergebnisses. Dieser Ausdruck behält die Reihenfolge der Elemente bei. Der zweite Ausdruck jedoch stellt eine Abweichung von der linearen Verteilung dar. Wenn daher  $f_{\min} = 0$ , fällt der Ausdruck heraus und die skalierte Lösung hält die relativen Größen der Elemente vollständig aufrecht. Dies garantiert, dass  $f \in [0, f_{\max}]$ .

**[0039]** Wenn  $f_{\min} \neq 0$  ist, kann sich die relative Reihenfolge der Elemente verändern und ein anderes Element kann die Grenze überspringen. Es wird der Fall betrachtet, bei dem ein weiteres Element  $k$  das Element  $j$  überschreitet, sodass  ${}^1f_k > {}^1f_j$ . Von Gleichung (10) aus gesehen beträgt die Differenz nach der ersten Iteration:

$${}^1f_k - {}^1f_j = \alpha({}^0f_k - {}^0f_j) + (1 - \alpha)f_{\min} \left( \frac{\alpha_k}{\alpha_i} - \frac{\alpha_j}{\alpha_i} \right) > 0 \quad (11)$$

**[0040]** Durch die Definition von Element  $j$  ist der erste Ausdruck kleiner als Null. Hinsichtlich des zweiten Ausdrucks sind die Elemente von  $a$  bei einer ausgeglichenen Konfiguration gleich. Daher kann in diesem Fall  ${}^1f_k$  niemals größer als  ${}^1f_j$  sein. Dies tritt immer dann auf, wenn sich die Spalten von  $R$  zu Null aufsummieren. Typischerweise werden Finger **19**, wenn sie nicht ausgeglichen sind, nicht in großem Maß von einer ausgeglichenen Konfiguration abweichen. Folglich wird die relative Differenz zwischen den Elementen von  $a$  klein sein und daher wird ein drittes Element die gewünschten Grenzen nach der ersten Iteration in Gleichung (8) selten überschreiten. Daher muss Schritt **116** nur einmal ausgeführt werden.

**[0041]** Obwohl die besten Arten zum Ausführen der Erfindung im Detail beschrieben wurden, werden Fachleute auf dem Gebiet, das diese Erfindung betrifft, verschiedene alternative Entwürfe und Ausführungsformen zum Umsetzen der Erfindung in die Praxis im Umfang der beigefügten Ansprüche erkennen.

### Patentansprüche

1. Verfahren zum Verteilen von Spannung auf  $n + 1$  Sehnen eines sehnengetriebenen Fingers in einem Robotersystem, wobei der Finger durch  $n$  Freiheitsgrade gekennzeichnet ist, wobei das Verfahren umfasst, dass:

eine maximale funktionale Spannung und eine minimale funktionale Spannung bestimmt werden; und ein Controller verwendet wird, um eine Spannung automatisch auf die  $n + 1$  Sehnen derart zu verteilen, dass jeder Sehne ein Spannungswert zugeordnet wird, der kleiner als die maximale funktionale Spannung und größer oder gleich der minimalen funktionalen Spannung ist.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das Verwenden eines Controllers, um eine Spannung automatisch zu verteilen, umfasst, dass eine lineare Skalierung von Gelenkmomenten jedes einer Vielzahl von Gelenken des sehnengetriebenen Fingers unter Verwendung des Controllers berechnet wird, um eine skalierte Lösung zu finden.

3. Verfahren nach Anspruch 1, wobei die minimale funktionale Spannung größer als Null ist und wobei eine interne Spannung des sehnengetriebenen Fingers minimiert wird, indem sichergestellt wird, dass ein niedrigster zugeordneter Spannungswert gleich der minimalen funktionalen Spannung ist.

4. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das Verwenden eines Controllers zur automatischen Verteilung von Spannung umfasst, dass eine Sehnenabbildung verwendet wird, die Momentarmdaten enthält, welche Sehnenspannungen auf Gelenkmomente in dem sehnengetriebenen Finger abbilden.

5. Robotersystem, das umfasst:

einen Roboter mit mindestens einem sehnengetriebenen Finger, der durch  $n$  Freiheitsgrade und  $n + 1$  Sehnen gekennzeichnet ist; und  
einen Controller mit einem Algorithmus zum Steuern der  $n + 1$  Sehnen;  
wobei der Algorithmus ausgelegt ist, um:  
eine maximale funktionale Spannung und eine minimale funktionale Spannung des sehnengetriebenen Fingers zu bestimmen; und  
eine Spannung automatisch auf die  $n + 1$  Sehnen derart zu verteilen, dass jeder Sehne ein Spannungswert zugeordnet wird, der kleiner als die maximale funktionale Spannung und größer oder gleich der minimalen funktionalen Spannung ist.

6. Robotersystem nach Anspruch 5, wobei der Algorithmus ausgelegt ist, um eine Spannung automatisch zu verteilen, indem: eine lineare Skalierung von Gelenkmomenten von jedem einer Vielzahl von Gelenken des sehnengetriebenen Fingers berechnet wird, um eine skalierte Lösung zu finden.

7. Robotersystem nach Anspruch 5, wobei der Controller eine Sehnenabbildung umfasst, die Momentarmdaten enthält, welche Sehnen Spannungen auf Gelenkmomente in dem sehnengetriebenen Finger abbilden, und wobei der Algorithmus ferner ausgelegt ist, um eine Spannung automatisch unter Verwendung der Sehnenabbildung zu verteilen.

8. Controller für einen sehnengetriebenen Roboterfinger mit  $n$  Freiheitsgraden, wobei der sehnengetriebene Finger  $n + 1$  Sehnen umfasst, wobei der Controller einen Algorithmus umfasst, der ausgelegt ist, um:  
eine maximale funktionale Spannung und eine minimale funktionale Spannung des sehnengetriebenen Fingers zu bestimmen; und  
eine Spannung automatisch auf die  $n + 1$  Sehnen zu verteilen, sodass jeder Sehne ein Spannungswert zugeordnet wird, der kleiner als die maximale funktionale Spannung und größer oder gleich der minimalen funktionalen Spannung ist.

9. Controller nach Anspruch 8, wobei der Algorithmus ausgelegt ist, um eine Spannung automatisch zu verteilen, indem: eine lineare Skalierung von Gelenkmomenten jedes einer Vielzahl von Gelenken des sehnengetriebenen Fingers berechnet wird, um eine skalierte Lösung zu finden.

10. Controller nach Anspruch 8, wobei der Controller eine Sehnenabbildung umfasst, die Momentarmdaten enthält, welche Sehnen Spannungen auf Gelenkmomente in dem sehnengetriebenen Finger abbilden, und wobei der Algorithmus ferner ausgelegt ist, um eine Spannung unter Verwendung der Sehnenabbildung automatisch zu verteilen.

Es folgen 2 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

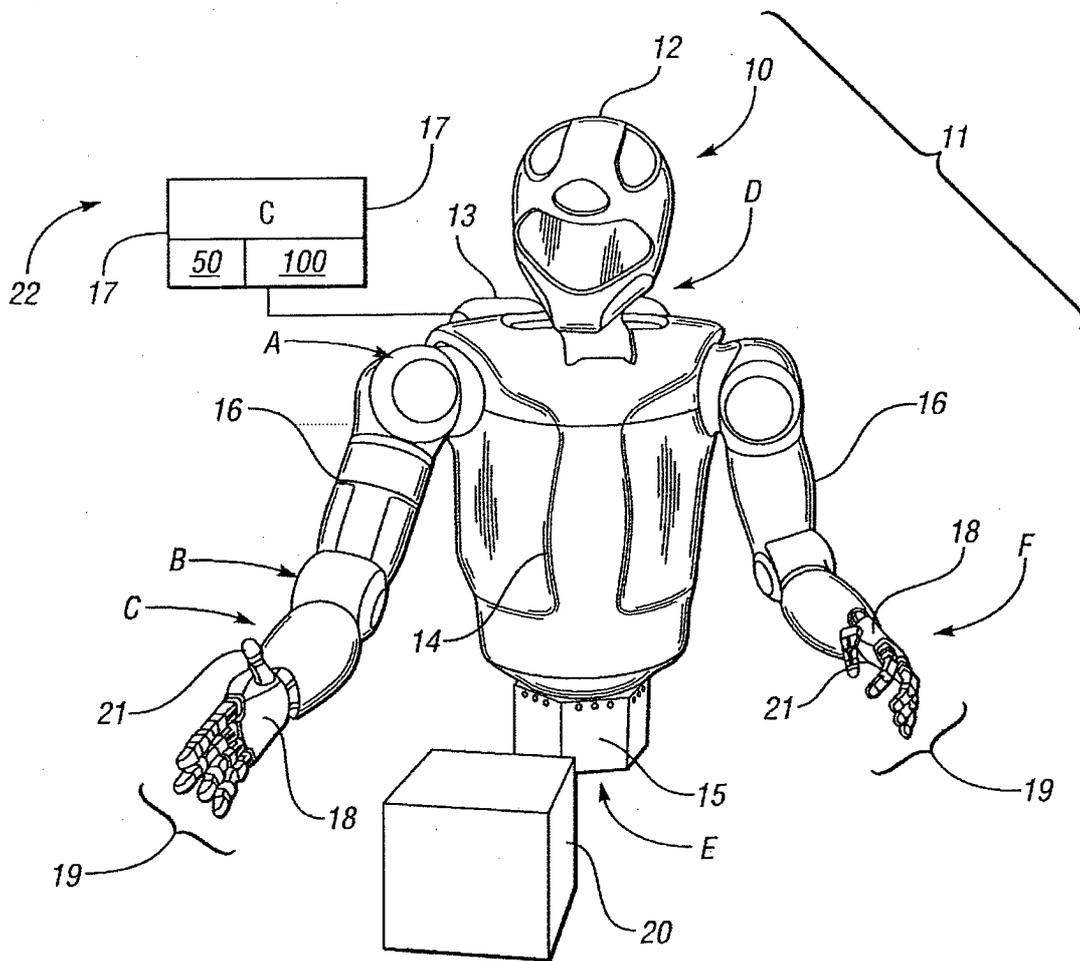


FIG. 1

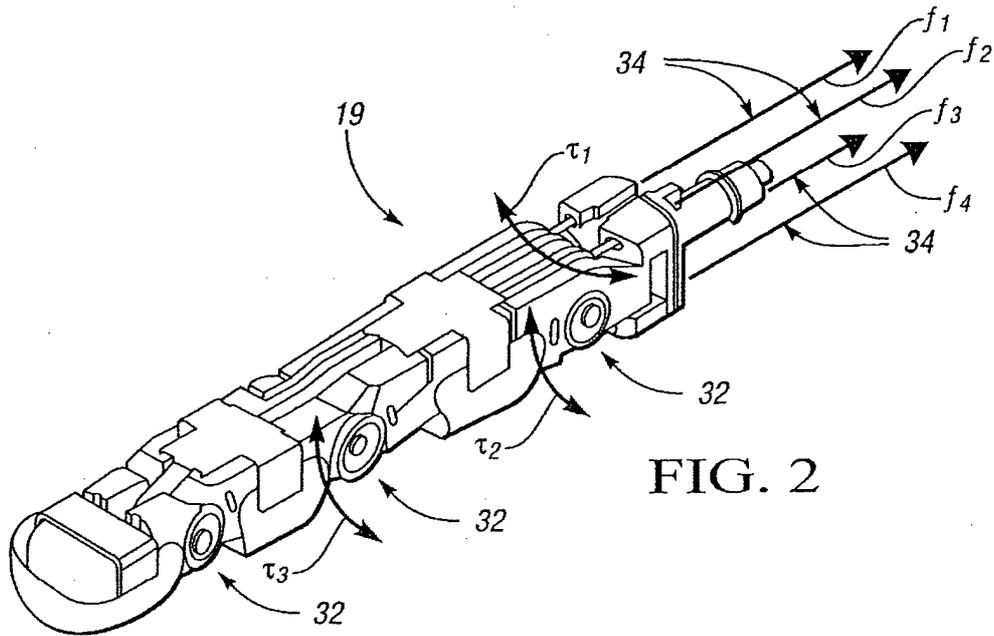


FIG. 2

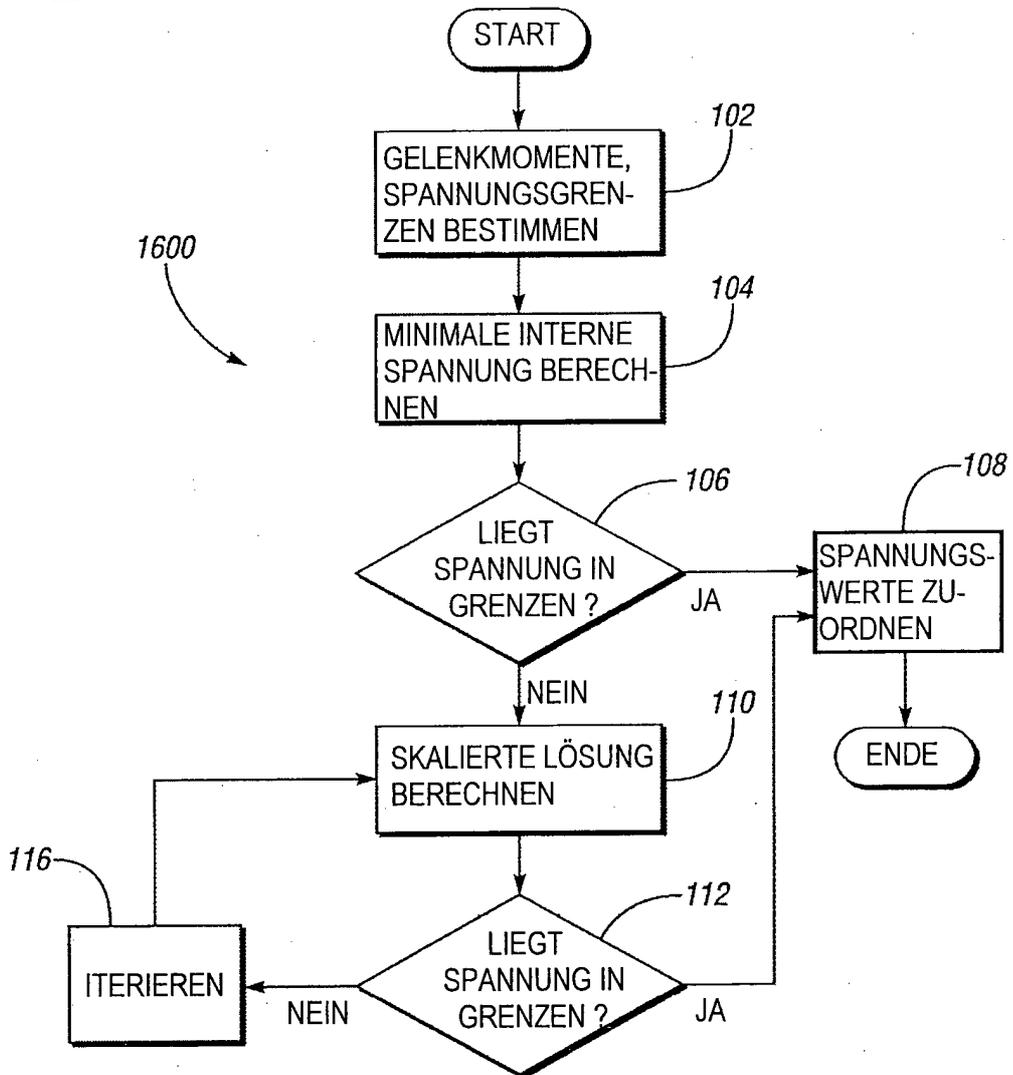


FIG. 3