



(10) **DE 10 2011 117 094 B4** 2015.06.25

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2011 117 094.8**
(22) Anmeldetag: **27.10.2011**
(43) Offenlegungstag: **03.05.2012**
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **25.06.2015**

(51) Int Cl.: **B25J 9/16 (2006.01)**
B25J 15/12 (2006.01)

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(30) Unionspriorität:
12/916,803 01.11.2010 US

(73) Patentinhaber:
GM Global Technology Operations LLC (n. d. Ges. d. Staates Delaware), Detroit, Mich., US; The U.S.A. as Represented by the Administrator of the National Aeronautics and Space Administration, Washington, D.C., US

(74) Vertreter:
Manitz, Finsterwald & Partner GbR, 80336 München, DE

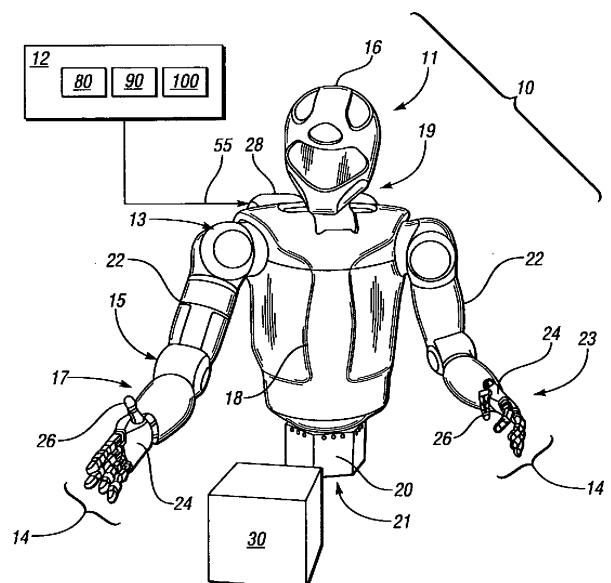
(72) Erfinder:
Abdallah, Muhammad E., Houston, Tex., US; Platt Jr., Robert J., Cambridge, Mass., US; Reiland, Matthew J., Oxford, Mich., US; Hargrave, Brian, Dickinson, Tex., US; Diftler, Myron A., Houston, Tex., US; Strawser, Philip A., Houston, Tex., US; Ihrke, Chris A., Hartland, Mich., US

(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE 10 2007 053 485	A1
DE 10 2009 057 285	A1
US 7 445 260	B2
US 2010 / 0 010 670	A1
US 2010 / 0 138 039	A1
JP H07- 28 502	A

(54) Bezeichnung: **ROBUSTER BETRIEB VON SEHNENGETRIEBENEN ROBOTERFINGERN UNTER VERWENDUNG VON KRAFT- UND POSITIONSBASIERTEN STEUERGESETZEN**

(57) Hauptanspruch: Robotersystem, umfassend:
einen von einer Sehne getriebenen Roboterfinger; und
ein Steuersystem umfassend einen Spannungssensor und eine Hostmaschine, wobei das Steuersystem ausgestaltet ist, um zu bestimmen, ob ein Spannungssensor zum Messen eines Spannungswerts der Sehne in dem Roboterfinger verfügbar ist, um den Finger selektiv über ein kraftbasiertes Steuergesetz zu steuern, wenn ein Spannungssensor im Finger verfügbar ist, und über ein positionsbasiertes Steuergesetz zu steuern, wenn der Spannungssensor im Finger nicht verfügbar ist, um den Spannungswert zu messen.



BeschreibungAUSSAGE HINSICHTLICH
VOM BUND GEFÖRDERTER
FORSCHUNG ODER ENTWICKLUNG

[0001] Diese Erfindung wurde mit Regierungsunterstützung unter dem NASA Space Act Agreement mit der Nummer SAA-AT-07-003 durchgeführt. Die hier beschriebene Erfindung kann von oder für die US-Regierung für Zwecke der US-Regierung (d. h. nicht kommerzielle Zwecke) hergestellt und verwendet werden, ohne dass darauf oder dafür Gebühren zu entrichten sind.

TECHNISCHES GEBIET

[0002] Die vorliegende Erfindung betrifft ein System und ein Verfahren zum Bereitstellen eines robusten Betriebs von sehnengetriebenen Roboterfingern in einem Robotersystem.

HINTERGRUND

[0003] Roboter sind automatisierte Vorrichtungen, die in der Lage sind, Objekte unter Verwendung einer Reihe von Gliedern zu manipulieren. Die Glieder sind durch ein oder mehrere stellgliedgetriebene Roboterjelenke miteinander verbunden. Jedes Gelenk in einem typischen Roboter stellt mindestens eine unabhängige Steuervariable oder einen Freiheitsgrad dar. Greiforgane sind die speziellen Manipulatoren, die zum Durchführen einer anstehenden Aufgabe verwendet werden, wie etwa dem Ergreifen eines Arbeitswerkzeugs. Daher trägt eine präzise Bewegungssteuerung der verschiedenen Roboter-Manipulatoren dazu bei, die benötigte Mobilität, Geschicklichkeit und arbeitsaufgabenbezogene Funktionalität zu erreichen.

[0004] Geschickte Roboter können dort verwendet werden, wo eine direkte Interaktion mit Vorrichtungen oder Systemen benötigt wird, die speziell für die menschliche Verwendung konstruiert sind, d. h. Vorrichtungen, die zur korrekten Manipulation menschenähnliche Geschicklichkeitsniveaus benötigen. Die Verwendung geschickter Roboter kann auch dort bevorzugt sein, wo eine direkte Interaktion mit menschlichen Bedienern notwendig ist, da die Bewegung des Roboters so programmiert werden kann, dass sie eine menschliche Bewegung annähert. Derartige Roboter können eine Vielzahl von Fingern enthalten, die unter Verwendung von Sehnen aus der Ferne betätigt werden können, wodurch die Gesamtgröße und das Gesamtgewicht des Roboters verringert wird. Derartige Sehnen müssen jederzeit innerhalb eines kalibrierten Spannungsniveaus straff gehalten werden.

[0005] Die Druckschrift DE 10 2009 057 285 A1 offenbart eine Impedanzsteuerung für sehnengetriebene

Manipulatoren, die Gelenkdrehmomente oder Gelenkimpedanzen unter Verwendung von errechneten Drehmomentfehlern steuert und minimale und maximale Sehnenanspannungen begrenzt.

[0006] In der Druckschrift DE 10 2007 053 485 A1 ist eine Roboterhand mit Fingern offenbart, die das Halten eines Objekts verändern kann, indem jeder Finger so gesteuert wird, dass eine Bedingung stabilen Greifens eingehalten wird, sodass die Summe aller von den Fingern auf das Objekt ausgeübten Kräfte und Momente Null wird.

[0007] Die Druckschrift US 2010/0 010 670 A1 offenbart eine sehnengetriebene Roboterhand mit mindestens zwei Fingern und Antriebseinheiten, um diese zu beugen und zu strecken. Eine Antriebseinheit weist dabei eine größere Antriebskraft als andere Einheiten auf und diese anderen Antriebseinheiten werden durch externe Kräfte passiv verschoben, die größer als ihre eigenen Antriebskräfte sind.

[0008] In der Druckschrift US 2010/0 138 039 A1 ist ein Verfahren zum Steuern einer Roboterhand offenbart, wobei jede Fingerspitze der Roboterhand eine Impedanzsteuerung ausführt, sodass ein Objekt auch trotz Sensorfehlern oder fehlerhaften Objektgestaltinformationen stabil ergriffen werden kann.

[0009] Die Druckschrift US 7 445 260 B2 offenbart eine Greiferhand mit Fingern, die jeweils Glieder, Gelenke und Aktoren zum Bewegen der Gelenke aufweisen. Die Aktoren können voneinander unabhängig gesteuert werden, und Positions- und Belastungsinformationen für die einzelnen Finger können erfasst werden. Damit können die Aktoren der Finger koordiniert gesteuert werden.

[0010] In der Druckschrift JP H07-028 502 A ist ein Anlagencontroller offenbart, der einen Sensor anhand von Daten überwacht, die vom Sensor geliefert werden. Wenn ein nicht zulässiger Zustand des Sensors detektiert wird, wird der Sensor entweder zu einem anderen Messmittel umgeschaltet oder das Steuerungssystem schaltet auf ein anderes Steuerungssystem um, das keine Sensoren verwendet.

[0011] Die Aufgabe der Erfindung besteht darin, einen sehnengetriebenen Finger eines Roboters so zu steuern, dass er auch bei Problemen mit einem Spannungssensor, der die Spannung der Sehne des Fingers erfasst, ein Objekt in seiner Umgebung sicher kontaktieren kann.

[0012] Diese Aufgabe wird durch die Gegenstände der unabhängigen Ansprüche gelöst.

ZUSAMMENFASSUNG

[0013] Entsprechend werden hier ein Steuersystem und Verfahren zum Steuern eines sehnengetriebenen Fingers eines geschickten Roboters offenbart. Durch Ausführen des Verfahrens, wie es hier offenbart ist, erreicht das vorliegende Steuersystem eine aktive Nachgiebigkeit im Finger, sodass der Finger ein Objekt in seiner Umgebung sicher kontaktieren kann, während es außerdem den Betrieb des Fingers bei Bedingungen mit einem verschlechterten Sensor ermöglicht. Dies wird durch eine flexible zweistufige Steuerarchitektur erreicht, in der ein oberer Steuerkreis entweder ein kraftbasiertes oder ein positionsbasiertes Steuergesetz für einen gegebenen Finger verwendet. Ein positionsbasiertes Steuergesetz wiederum kann selektiv eine aktive Nachgiebigkeit für beliebige Sehnen enthalten, die es steuert.

[0014] Das Steuergesetz, das gewählt wird, hängt davon ab, ob alle, keine oder einige einer Anzahl von Spannungssensoren im Finger während eines gegebenen Manövers verfügbar sind. Ein Steuergesetz für sehnengetriebene Finger benötigt typischerweise eine Spannungsrückmeldung, um die interne Spannung der Sehnen aufrecht zu erhalten. Das hier präsentierte Positionssteuergesetz hält die interne Spannung nominell aufrecht, indem es die zweistufige Steuerarchitektur mit einer Zielraumbeschränkung [engl.: range-space constraint] wie hier offenbart implementiert.

[0015] Die Begriffe "kraftbasiertes Steuergesetz" und "positionsbasiertes Steuergesetz" bezeichnen, so wie sie hier verwendet werden, die Steuerung eines Roboters beruhend auf jeweiligen Kraft- oder Positionsbefehlen und Rückmeldungssignalen, wie auf dem Gebiet verstanden wird. Das flexible Steuer-schema ist fingerspezifisch, d. h. die verschiedenen sehnengetriebenen Finger an einer gegebenen Roboterhand können ein Steuergesetz aufweisen, das in jedem Moment für diesen Finger im Vergleich mit den anderen Fingern anders arbeitet.

[0016] Insbesondere enthält ein Robotersystem einen Roboterfinger, der von einer Sehne angetrieben wird, einen Spannungssensor und ein Steuersystem. Die Sehne wird durch ein Stellglied gesteuert. Das Steuersystem steuert den Finger selektiv über ein kraftbasiertes Steuergesetz, wenn der Spannungssensor zum Messen des Spannungswerts verfügbar ist, und über ein positionsbasiertes Steuergesetz, wenn der Spannungssensor nicht verfügbar ist.

[0017] Es kann eine Vielzahl von Sehnen verwendet werden, von denen jede einen entsprechenden Spannungssensor aufweist. Wenn nur einige der Spannungssensoren verfügbar sind, kann das Steuersystem selektiv einen Nachgiebigkeitswert in das positionsbasierte Steuergesetz eingeben. Der

Nachgiebigkeitswert kann eine Funktion eines Spannungsfehlers sein, der als die Differenz zwischen einer gewünschten Spannung und einer tatsächlichen Spannung einer der Sehnen bestimmt werden kann.

[0018] Ein Steuersystem für einen durch eine Sehne angetriebenen Roboterfinger enthält einen Spannungssensor und eine Hostmaschine. Der Spannungssensor ist so positioniert, dass er einen Spannungswert der Sehne misst, und die Hostmaschine ist ausgestaltet, um die Verfügbarkeit des Spannungssensors zum Messen des Spannungswerts zu bestimmen. Außerdem ist die Hostmaschine ausgestaltet, um den Finger selektiv über ein kraftbasiertes Steuergesetz, wenn der Spannungssensor zum Messen des Spannungswerts verfügbar ist, und über ein positionsbasiertes Steuergesetz zu steuern, wenn der Spannungssensor zum Messen des Spannungswerts nicht verfügbar ist.

[0019] Es wird auch ein Verfahren bereitgestellt, um einen sehnengetriebenen Finger in einem Robotersystem zu steuern. Das Verfahren umfasst, dass die Verfügbarkeit eines Spannungssensors zum Messen eines Spannungswerts der Sehne bestimmt wird und dann der Finger mit Hilfe eines Steuersystems selektiv unter Verwendung eines kraftbasierten Steuergesetzes, wenn der Spannungssensor zum Messen des Spannungswerts verfügbar ist, und unter Verwendung eines positionsbasierten Steuergesetzes, wenn der Spannungssensor zum Messen des Spannungswerts nicht verfügbar ist, gesteuert wird.

[0020] Die vorstehenden Merkmale und Vorteile und andere Merkmale und Vorteile der vorliegenden Erfindung ergeben sich leicht aus der folgenden genauen Beschreibung der besten Arten, um die Erfindung auszuführen, wenn sie in Verbindung mit den beiliegenden Zeichnungen gelesen wird.

KURZBESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

[0021] Fig. 1 ist eine schematische Darstellung eines Robotersystems, das einen Roboter mit sehnengetriebenen Fingern aufweist, die wie hier offengelegt gesteuert werden;

[0022] Fig. 2 ist eine Darstellung in schematischer perspektivischer Ansicht einer Unterarmordnung für den in Fig. 1 gezeigten Roboter, wobei die Armordnung eine Vielzahl sehnengetriebener Roboterfinger enthält;

[0023] Fig. 3 ist eine Darstellung in schematischer perspektivischer Ansicht einer Sehne und eines Stellglieds, die zum Steuern der in Fig. 2 gezeigten Roboterfinger verwendet werden können;

[0024] Fig. 4 ist eine schematische perspektivische Ansicht eines sehnengetriebenen Roboterfingers;

[0025] Fig. 5 ist eine schematische Darstellung einer zweistufigen Steuerarchitektur zum Steuern des in Fig. 2 und Fig. 4 gezeigten sehnengetriebenen Roboterfingers; und

[0026] Fig. 6 ist ein Flussdiagramm, das das vorliegende Verfahren zum Steuern des in Fig. 2 und Fig. 4 gezeigten sehnengetriebenen Roboterfingers beschreibt.

BESCHREIBUNG

[0027] Mit Bezug auf die Zeichnungen, in denen gleiche Bezugszeichen in den verschiedenen Ansichten gleiche oder ähnliche Komponenten bezeichnen und mit Fig. 1 beginnend ist ein Robotersystem 10 gezeigt, das einen geschickten Roboter 11 und ein Steuersystem 12 umfasst. Der Roboter 11 enthält verschiedene Manipulatoren, welche eine Vielzahl sehnengetriebener Finger 14 umfassen. Das Steuersystem 12 für den Roboter 11 arbeitet mit Hilfe einer zweistufigen Steuerhierarchie oder -architektur. Der Begriff "zweistufig" bedeutet, so wie er hier verwendet wird, dass ein erster Controller oder ein Controller für eine Steuerung auf der oberen Stufe, der in Fig. 1 als ein Gelenkcontroller 80 gezeigt ist, auf einer höheren hierarchischen Ebene arbeitet als ein zweiter Controller oder Controller für ein Steuergesetz einer unteren Stufe, der in Fig. 1 als ein Stellgliedcontroller 90 gezeigt ist. Die Controller 80 und 90 können als zwei verschiedene Prozessoren und zugehörige Hardwarevorrichtungen ausgeführt sein oder alternativ als verschachtelte softwarebasierte Steuerkreise, die jeweils in einer einzelnen oder in einer verteilten Hardwarevorrichtung vorhanden sind und von einem oder mehreren Prozessoren automatisch ausgeführt werden.

[0028] Der Gelenkcontroller 80 verwendet entweder kraft- oder positionsbasierte Steuergesetze in einem oberen Kreis, um die Position verschiedener Fingergelenke (siehe Fig. 4) in Abhängigkeit davon zu steuern, welches Steuergesetz gewählt wird. Die Wahl des speziellen Steuergesetzes durch das Steuersystem beruht auf der Verfügbarkeit der Spannungssensoren 58 (siehe Fig. 3), die in einem gegebenen Finger 14 verfügbar sind, d. h. online und vollständig funktionierend. Der Stellgliedcontroller 90 verwendet die positionsbasierte Steuerung in einem unteren Kreis, um die Position einer Sehne 50 (siehe Fig. 3) eines gegebenen Fingers 14 zu steuern.

[0029] Das Steuersystem 12 von Fig. 1 hält automatisch genügend Spannung in den in Fig. 3 gezeigten Sehnen 50 aufrecht. Typischerweise wird ein kraftbasiertes Steuergesetz verwendet, um Sehnen Spannungen zu regeln, etwa über eine Krafrückmeldung in einem geschlossenen Regelkreis. Die physikalischen Sensoren, die zum Messen der Spannung verwendet werden, können jedoch eine suboptima-

le Robustheit aufweisen. Als Folge können alle oder einige der Spannungssensoren, die in oder entlang eines Fingers 14 des Roboters 11 positioniert sind, in einem beliebigen speziellen Moment zur Verwendung verfügbar sein oder auch nicht. Das Steuersystem 12 ist daher ausgestaltet, um jeden der Finger 14 unter Verwendung der Gelenk- und Stellgliedcontroller 80 bzw. 90 gemäß Kraft- oder Positionssteuergesetzen und mit oder ohne eine selektive Nachgiebigkeit wie nachstehend erläutert automatisch und individuell zu steuern. Innerhalb des Gelenkcontrollers 80 wird das spezielle Steuergesetz, das angewendet wird, d. h. Kraft oder Position, auf eine Weise gewählt, die von der Anzahl verfügbarer Spannungssensoren für einen gegebenen Finger 14 abhängt.

[0030] Bei einer möglichen Ausführungsform kann der in Fig. 1 gezeigte Roboter 11 mit einem menschenähnlichen Erscheinungsbild und mit menschenähnlichen Geschicklichkeitsebenen in dem Maß ausgestaltet sein, das zum Durchführen einer gegebenen Arbeitsaufgabe notwendig ist. Humanide und andere geschickte Roboter können dort verwendet werden, wo eine direkte Interaktion mit Vorrichtungen oder Systemen benötigt wird, die speziell für die menschliche Verwendung konstruiert sind, zum Beispiel beliebige Vorrichtungen, die menschenähnliche Geschicklichkeitsniveaus erfordern, um ein Objekt 30 korrekt zu manipulieren. Die Verwendung eines Humanoiden wie etwa des Roboters 11, der in Fig. 1 dargestellt ist, kann dort bevorzugt sein, wo eine direkte Interaktion zwischen dem Roboter und menschlichen Bedienern notwendig ist, da die Bewegung des Roboters so programmiert werden kann, dass sie eine menschliche Bewegung genau annähert. Die Finger 14 des Roboters 11 werden durch Hardwarekomponenten des Steuersystems 12, z. B. durch eine Hostmaschine, einen Server, oder ein Netzwerk aus derartigen Vorrichtungen während der Ausführung eines beliebigen Manövers oder einer beliebigen Arbeitsaufgabe, bei dem bzw. der der Roboter auf das Objekt 30 einwirkt, über einen Satz von Steuersignalen 55 direkt gesteuert.

[0031] Der in Fig. 1 gezeigte Roboter 11 kann so programmiert sein, dass er automatisierte Aufgaben mit vielen Freiheitsgraden (DOF) durchführt und dass er andere interaktive Aufgaben durchführt oder dass er andere integrierte Systemkomponenten steuert, z. B. Einspannen, Beleuchten, Relais, usw. Gemäß einer möglichen Ausführungsform kann der Roboter 11 eine Vielzahl unabhängig und voneinander abhängig bewegbarer stellgliedgetriebener Robotergelenke aufweisen, von denen einige sich überschneidende Bewegungsbereiche aufweisen. Zusätzlich zu den verschiedenen Gelenken 23 der Finger 14, welche die verschiedenen Fingerglieder derselben trennen und bewegen, können die Robotergelenke des Roboters 11 ein Schultergelenk, dessen Position in Fig. 1 allgemein durch Pfeil 13 angezeigt ist, ein Ellenbo-

gengelenk (Pfeil **15**), ein Handgelenk (Pfeil **17**), ein Nackengelenk (Pfeil **19**) und ein Taillengelenk (Pfeil **21**) umfassen.

[0032] Immer noch mit Bezug auf **Fig. 1** kann jedes Robotergelenk einen oder mehrere Freiheitsgrade aufweisen. Zum Beispiel können bestimmte nachgiebige Gelenke wie etwa das Schultergelenk (Pfeil **13**) und das Ellenbogengelenk (Pfeil **15**) mindestens zwei Freiheitsgrade in der Form von Knicken und Drehen aufweisen. Auf ähnliche Weise kann das Nackengelenk (Pfeil **19**) mindestens drei Freiheitsgrade aufweisen, während die Taille und das Handgelenk (Pfeil **21** bzw. **17**) einen oder mehrere Freiheitsgrade aufweisen können. In Abhängigkeit von der Komplexität der Aufgabe kann sich der Roboter **11** mit über **42** Freiheitsgraden bewegen. Jedes Robotergelenk enthält ein oder mehrere Stellglieder, zum Beispiel Gelenkmotoren, lineare Stellglieder, rotatorische Stellglieder und dergleichen, und wird durch diese intern angetrieben.

[0033] Bei einer möglichen Ausführungsform kann der Roboter **11** nur die in **Fig. 2** gezeigte Unterarmordnung **75** umfassen. Bei einer anderen Ausführungsform kann der Roboter **11** zusätzliche menschenähnliche Komponenten, wie etwa einen Kopf **16**, einen Torso **18**, eine Taille **20**, Arme **22**, Hände **24**, Finger **14** und diesen gegenüberstellbare Daumen **26** umfassen, wobei die verschiedenen vorstehend erwähnten Gelenke innerhalb dieser oder zwischen diesen Komponenten angeordnet sind. Wie bei einem Menschen können beide Arme **22** und andere Komponenten Bewegungsbereiche aufweisen, die sich bis zu einem gewissen Grad überschneiden. Der Roboter **11** kann auch eine für die Aufgabe geeignete Halterung oder Basis (nicht gezeigt) enthalten, wie etwa Beine, Laufflächen oder eine andere bewegbare oder feststehende Basis in Abhängigkeit von der speziellen Anwendung oder der beabsichtigten Verwendung des Roboters. Eine Stromversorgung **28** kann am Roboter **11** einstückig montiert sein, z. B. ein wiederaufladbarer Batteriestapel oder eine andere geeignete Energieversorgung, die auf dem Rücken des Torsos **18** mitgeführt oder getragen wird, oder die durch ein Spannseil abgesetzt verbunden sein kann, um genügend elektrische Energie für die verschiedenen Gelenke zur Bewegung derselben bereitzustellen.

[0034] Das Steuersystem **12** und jeder der Controller **80** und **90** desselben können, wie vorstehend irgendwo erwähnt, jeweils als Server oder Hostmaschine ausgeführt sein, d. h. als ein oder mehrere digitale Computer oder Datenverarbeitungsvorrichtungen, die jeweils einen oder mehrere Mikroprozessoren oder zentrale Verarbeitungseinheiten (CPU), einen Festwertspeicher (ROM), einen Speicher mit wahlfreiem Zugriff (RAM), einen elektrisch löschraren programmierbaren Festwertspeicher (EEPROM),

einen Hochgeschwindigkeits-Taktgeber, Analog/Digital-Schaltungen (A/D-Schaltungen), Digital/Analog-Schaltungen (D/A-Schaltungen) und beliebige benötigte Eingabe/Ausgabe-Schaltungen und Vorrichtungen (I/O-Schaltungen und Vorrichtungen) sowie Signalaufbereitungs- und Pufferelektronik aufweisen.

[0035] Obwohl sie der Einfachheit und Klarheit halber in **Fig. 1** als eine einzige Vorrichtung gezeigt sind, können die verschiedenen Elemente des Steuersystems **12** über so viele verschiedene Hardware- und Softwarekomponenten verteilt sein, wie es notwendig ist, um den Roboter **11** optimal zu steuern. Die im Steuersystem **12** vorhandenen oder dafür leicht zugänglichen individuellen Steueralgorithmen können im ROM oder in einer anderen geeigneten konkreten Speicherstelle und/oder Speichervorrichtung gespeichert sein und von zugehörigen Hardwarekomponenten des Steuersystems automatisch ausgeführt werden, um die jeweilige Steuerfunktionalität bereitzustellen.

[0036] Mit Bezug auf **Fig. 2** kann eine Unterarmordnung **75** als Teil des in **Fig. 1** gezeigten Roboters **11** verwendet werden. Jede Unterarmordnung **75** enthält eine Hand **24** mit einer Vielzahl sehnengetriebener Finger **14** und einem sehnengetriebenen Daumen **26**. Der Begriff "sehnengetrieben" wird nachstehend mit Bezug auf **Fig. 3** erläutert. Die Unterarmordnung **75** enthält eine Vielzahl von Fingerstellgliedern **40**, die jeweils zum selektiven Ziehen an und Freigeben einer oder mehrerer Sehnen **50** (siehe **Fig. 3**) in einem Finger **14** oder in einem Daumen **26** ausgestaltet sind. Die Unterarmordnung **75** enthält ferner eine Vielzahl von Handgelenkstellgliedern **38** zum Bewegen des Handgelenks (Pfeil **17**). Anordnungen aus gedruckten Leiterplatten (PCBA) **39** für die Fingerstellglieder **40** und/oder die Handgelenkstellglieder **38** können an oder in der Unterarmordnung **75** zur effizienten Verpackung wie gezeigt positioniert sein. Die Unterarmordnung **75** kann an einem Kraftaufnehmer **32** angebracht sein, der zum Verbinden der Unterarmordnung mit dem Rest des Arms **22** des in **Fig. 1** gezeigten Roboters **11** verwendet wird.

[0037] Mehrere Fingerstellglieder **40** können jedem Finger **14** und dem Daumen **26** entsprechen. Im Allgemeinen wird ein Fingerstellglied **40** für jeden verfügbaren Freiheitsgrad plus ein zusätzliches Fingerstellglied verwendet. Daher benötigt jeder Finger **14**, der drei Freiheitsgrade aufweist, vier Fingerstellglieder **40**, während jeder Finger, der zwei Freiheitsgrade aufweist, drei Fingerstellglieder benötigt usw.

[0038] Mit Bezug auf **Fig. 3** ist eine schematische perspektivische Ansicht einer möglichen Ausführungsform des Fingerstellglieds **40** bereitgestellt. Das Fingerstellglied **40** kann einen Motor **44**, ein Zahnradgetriebe **46**, ein Stellgliedgehäuse **48**, eine

Sehne **50** und einen Sehnenabschluss **52** enthalten. Die Sehne **50** verläuft vom Stellgliedgehäuse **48** und durch einen der Finger **14** hindurch, wobei sie am Ende des Fingers endet. Die Sehne **50** ist innerhalb des Fingers **14** in einer nicht zentrierten Position dargestellt, da mehr als eine Sehne innerhalb eines gegebenen Fingers verlaufen kann. Der Motor **44**, das Zahnradgetriebe **46** und das Stellgliedgehäuse **48** können alle in der Unterarmordnung **75** angeordnet sein, um den in den Fingern **14** und im Daumen **26** benötigten Einbauraum zu minimieren und um zu ermöglichen, dass die größeren Komponenten des Fingerstellglieds **40**, wie etwa das Stellgliedgehäuse **48**, mit Bezug auf die Finger und den Daumen entfernt eingebaut werden.

[0039] Die Sehne **50** kann durch eine Hülle oder Leitungsverkleidung **54** geschützt sein, die innerhalb einer schützenden Außenleitung **56** positioniert ist. Der Spannungssensor **58** misst die Kompressionskraft an der Leitung **56**, um den Spannungsbetrag zu bestimmen, der auf der Sehne **50** platziert ist. Die Spannung in den Sehnen **50** kann vom in **Fig. 1** gezeigten Steuersystem **12** verwendet werden, um die Gelenkdrehmomente zu berechnen, die an den verschiedenen Gelenken eines gegebenen Fingers **14** erzeugt werden oder auftreten, welche wiederum vom Steuersystem verwendet werden können, um die Finger und Daumen **26** einer gegebenen Hand **24** zu steuern.

[0040] Wenn das Fingerstellglied **40** die Sehne **50** bewegt, verschiebt sich die Sehne relativ zum Spannungssensor **58**. Die Sehne **50** endet im Finger **14** am Sehnenabschluss **52**. Eine Bewegung der Sehne **50** bewirkt eine Relativbewegung des Sehnenabschlusses **52**, wodurch der Finger **14** bewegt wird. Eine Kraft kann auf den Sehnenabschluss **52** entweder intern, d. h. durch eine Bewegung des Fingerstellglieds **40**, oder extern, d. h. auf den Finger **14** durch das Objekt **30** von **Fig. 1** aufgebracht werden, welche bewirkt, dass die Sehne **50** eine Kraft auf das Stellgliedgehäuse **48** ausübt.

[0041] Mit Bezug auf **Fig. 4** wird das Steuersystem **12** von **Fig. 1** wie hier offengelegt verwendet, um jeden Finger **14** mit Bezug auf einen beliebigen anderen Finger einer gegebenen Hand **24** individuell zu steuern. Bei der Drehmomentsteuerung eines sehnengetriebenen Fingers müssen die gewünschten Gelenkdrehmomente zuerst in Sehnen Spannungswerte übersetzt werden. Dieses Problem wird als Spannungsverteilung bezeichnet, und diese muss sicherstellen, dass alle Spannungswerte nicht negativ sind. Der Finger **14** weist eine Vielzahl von Fingergelenken **23** auf, von denen einige unabhängige Gelenke sind, wobei die Gelenkpositionen und Gelenkdrehmomente jedes Fingergelenks durch die Pfeile τ_1 , τ_2 und τ_3 angezeigt sind. Der Finger **14** weist n unabhängige Gelenke (n Freiheitsgrade) und $n + 1$ Sehnen **50** auf.

[0042] Der in **Fig. 4** gezeigte Finger **14** weist drei Freiheitsgrade auf, daher gibt es bei dieser speziellen Ausführungsform vier Sehnen **50**, obwohl auch mehr oder weniger Sehnen und/oder Freiheitsgrade verwendet werden können, ohne den beabsichtigten Umfang der Erfindung zu verlassen. Es wird darauf hingewiesen, dass das distale Gelenk mit dem benachbarten Gelenk, d. h. dem Mittelgelenk, mechanisch gekoppelt ist; folglich ist das distale Gelenk kein unabhängiger Freiheitsgrad. Außerdem ist die Steuerung des Fingers **14** vollständig bestimmt, so wie der Begriff auf dem Gebiet verstanden wird, und daher ist die Anzahl der Sehnen **50** gleich $n + 1$, oder in der in **Fig. 4** gezeigten speziellen Ausführungsform gleich 4. Jedes unabhängige Gelenk **23** ist durch ein Gelenkdrehmoment τ und eine Gelenkposition q gekennzeichnet. Jede der Sehnen **50** ist durch eine Spannung f gekennzeichnet, die in **Fig. 4** als f_1 , f_2 , f_3 und f_4 dargestellt sind, oder allgemein als f_1 bis f_{n+1} . Die Sehnen **50** weisen jeweils eine bestimmbare Position (x) auf, d. h. $x_1 - x_4$.

[0043] Die Beziehung zwischen den n Gelenkdrehmomenten und m Sehnen Spannungen, wobei $m > n$, wird als $\tau = Rf$ dargestellt. Die Variable $R \in \mathbb{R}^{n \times m}$ ist als Sehnenkennfeld bzw. Sehnenabbildungsmatrix bekannt und sie enthält die verschiedenen Gelenkradiusdaten, die zum Abbilden von Sehnen Spannungen auf Gelenkdrehmomente benötigt werden. Damit ein System durch Sehnen steuerbar ist, muss das Sehnenkennfeld R eine Matrix mit vollem Zeilenrang sein, und es muss eine vollständig positive Spaltenmatrix w geben, sodass $R^T w = 0$. Die "interne Spannung" ist eine gewichtete Summe aller Spannungen in einem Finger **14**; folglich zeigt eine kleinere interne Spannung kleinere Spannungen zwischen den verschiedenen Sehnen **50** und eine kleinere Nettokraft an.

[0044] Umgekehrt folgt die Lösung für die Spannung f , wobei R^+ die Pseudoinverse von R ist, I die Identitätsmatrix ist und λ ein willkürlicher Wert ist:

$$f = R^+ \tau + f_{\text{int}}$$

$$f_{\text{int}} \doteq (I - R^+ R) \lambda$$

wobei f_{int} die internen Spannungen darstellt, die im Nullraum von R liegen und Nettodrehmomente von Null erzeugen. Die Matrix $[I - R^+ R]$ stellt den Abbildungsoperator in den Nullraum von R bereit. Bei gegebenen quasistatischen Bedingungen ist immer dann $f = f_{\text{int}}$, wenn externe Kräfte von Null auf den Finger **14** wirken.

[0045] Die gleiche Matrix R drückt die Beziehung zwischen einer Sehne **50** und Gelenkgeschwindigkeiten aus. Auf der Grundlage der Prinzipien der virtuellen Arbeit ist der Beitrag der Gelenkbewegung zu der Sehnen geschwindigkeit gleich $R^T \dot{q}$. Unter der

Annahme eines konstanten Werts für R ist die Nettoverschiebung einer Sehne **50** eine Summe aus dem Gelenkbeitrag plus der Veränderung der Länge l dieser Sehne oder:

$$\Delta x = R^T \Delta q + \Delta l.$$

[0046] Es wird nun ein Modell einer Sehne **50** als lineare Feder bereitgestellt und angenommen, dass die Sehne straff bleiben wird. Es wird auch angenommen, dass die in einem Finger **14** verwendeten Sehnen **50** den gleichen Steifigkeitswert k_t aufweisen, da der Unterschied bei den Sehnenlängen nicht ausreicht, um einen signifikanten Unterschied bei der Steifigkeit zu gewährleisten. Die folgende Analyse setzt die Veränderung bei der Länge (Δl) in Beziehung mit einer Veränderung bei Sehnenspannungen und Gelenkdrehmomenten:

$$\Delta f = k_t \Delta l$$

$$\begin{aligned} \Delta \tau &= R \Delta f \\ &= k_t R \Delta l \end{aligned}$$

folglich,

$$\Delta l = \frac{1}{k_t} R^+ \Delta \tau + \Delta l_{\text{int.}}$$

[0047] Der Wert ($\Delta l_{\text{int.}}$), der die Längenänderung im Nullraum von R darstellt, d. h. die Längenänderung, die nur die internen Spannungen und nicht die Gelenkdrehmomente beeinflusst, kann geschrieben werden als:

$$\Delta l_{\text{int.}} = (I - R^+ R) \delta,$$

wobei der Wert der Variable δ willkürlich ist. Die endgültige Beziehung für die Sehnenverschiebung kann geschrieben werden als:

$$\Delta x = R^T \Delta q + \frac{1}{k_t} R^+ \Delta \tau + \Delta l_{\text{int.}}$$

[0048] In Abwesenheit einer Spannungsrückmeldung, z. B. wenn einige oder alle Spannungssensoren **58** von **Fig. 3** zur Verwendung innerhalb eines gegebenen Fingers **14** nicht verfügbar sind, stellen die vom Steuersystem **12** von **Fig. 1** verwendeten Positionsgesetze ein schnelles Steuerverhalten auf der Grundlage der Position, einen geringen Fehler und kein Überschwingen bereit, während gleichzeitig die interne Spannung der Sehnen **50** im Finger aufrechterhalten wird. Um die interne Spannung konstant zu halten, wird der Wert $\Delta l_{\text{int.}}$ aus der unmittelbar vorstehenden Gleichung eliminiert.

[0049] Mit Bezug auf **Fig. 5** zeigt eine schematische Darstellung des Steuersystems **12** von **Fig. 1** das er-

wähnte zweistufige Steuerschema. Das Steuersystem **12** enthält einen oberen Steuerkreis und einen unteren Steuerkreis, d. h. den Gelenkcontroller **80** bzw. den Stellgliedcontroller **90**. Der Gelenkcontroller **80** verarbeitet Signale, die einen Vektor der Gelenkposition (q), der als Pfeil **31** dargestellt ist, und eine gewünschte oder Referenzgelenkposition (q_d) beschreiben, die als Pfeil **131** dargestellt ist, über einen Verarbeitungsknoten **60**, um dadurch einen Gelenkpositionsfehler ($q - q_d$), d. h. Pfeil **35**, zu berechnen. Auf ähnliche Weise ist eine Sehnenkraft (f) als Pfeil **37** gezeigt und eine Sehnenposition (x) ist als Pfeil **33** gezeigt. Ein weiterer Verarbeitungsknoten **60** nimmt die befohlene Sehnenposition (x_d), die als Pfeil **133** gezeigt ist, berechnet den Sehnenpositionsfehler ($x - x_d$) **233** und sendet ihn in den unteren Kreis des Stellgliedcontrollers **90** hinunter.

[0050] Der Stellgliedcontroller **90** besteht aus einem einfachen Positionscontroller für die Stellgliedposition; er wird zuerst zum Maximieren der Leistung mit einem Antwortverhalten erster Ordnung abgestimmt, um ein Überschwingen zu vermeiden. Der Gelenkcontroller **80** kann entweder aus einem kraftbasierten Controller für die Fingergelenke, wie in der Technik verstanden wird, oder einem positionsbasierten Controller bestehen.

[0051] Es wird hier ein neuer Positionscontroller eingefügt, der eine diskrete Version eines Geschwindigkeitscontrollers implementiert, wobei die aktuellen Positionen der Stellglieder kontinuierlich zurückgemeldet werden und auf der Grundlage der Gelenkfehler mit einem Deltavektor kombiniert werden. Auf der Grundlage der vorstehenden kinematischen Beziehungen kann die befohlene Sehnenposition (x_d), d. h. Pfeil **133**, geschrieben werden als

$$x_d = x - k_p R^T \Delta q,$$

wobei Δq den Gelenkpositionsfehler ($q - q_d$), d. h. Pfeil **35** wie in **Fig. 5** gezeigt, darstellt und k_p eine skalare konstante Verstärkung ist. Dieses Steuergesetz setzt die Verschiebung im Nullraum der vorherigen Gleichung auf Null.

[0052] Dieses Steuergesetz erzeugt eine schnelle Antwort, die den stationären Fehler aufhebt und ein überkritisch gedämpftes [engl.: over-damped] Verhalten beibehält. Jedoch beschränkt es Stellgliedpositionen nicht aktiv auf den Zielraum [engl.: range-space]. Folglich können Störungen unproportionale Veränderungen bei den Stellgliedpositionen verursachen, welche die internen Spannungen verändern. Dies kann durch die Tatsache verschärft werden, dass die in **Fig. 3** gezeigte Sehne **50** einer Kompression keinen Widerstand leisten kann. Um dies zu lösen, wird die Ausgabe in den Zielraum des Fingers **14** abgebildet, was ermöglicht, dass der untere Kreis den Zielraum aktiv einstellt. Dies stellt das endgültige Steu-

ergesetz für den oberen Kreis bereit: $x_d = R^T R x - k_p R^T \Delta q$. Die Zielraumbeschränkung dieser Gleichung erfordert die in **Fig. 5** gezeigte zweistufige Hierarchie. Diese Zielraumbeschränkung ermöglicht, dass das System einer Bewegung im Nullraum widersteht und folglich, dass es die anfänglichen internen Spannungen, die auf die Sehne ausgeübt werden, nominell beibehält.

[0053] Ein alternatives Schema für das Positionssteuergesetz beruht auf einer Proportional-Integral-Kompensationsvorrichtung (PI-Kompensationsvorrichtung). Dieses Gesetz implementiert einen Optimalwertausdruck für die endgültige Position jedes der Stellglieder, der mit einem PI-Ausdruck verwendet wird, um einen stationären Fehler zu beseitigen. Wenn das System derart initialisiert wird, dass die anfängliche Sehnenposition x und die anfängliche Gelenkposition q Null sind, dann sind die Stellgliedpositionen, die mit den gewünschten Gelenkpositionen (q_d), Pfeil **131**, übereinstimmen, ohne die Länge der Sehne **50** von **Fig. 3** zu verändern, gegeben durch $R^T q_d$. Da das kinematische Modell möglicherweise nicht perfekt ist, wird eine PI-Kompensationsvorrichtung verwendet, um irgendwelche Fehler zu beseitigen.

[0054] Somit ist die befohlene Position (x_d), Pfeil **133**, aus der Optimalwertsteuerung wie folgt:

$$x_d = -R^T(k_p \Delta q + k_i \int \Delta q dt).$$

[0055] Dieser Optimalwertausdruck führt zu einer schnellen Anstiegszeit, während der PI-Ausdruck zu einem stationären Fehler von Null führt.

[0056] Wenn einige, aber nicht alle einer Gesamtanzahl verfügbarer Spannungssensoren für den Finger **14** verfügbar sind, kann das Steuersystem **12** selektiv eine Positionssteuerung für diesen Finger in Verbindung mit einer selektiven Nachgiebigkeit für die Sehnen anwenden, wodurch die Positionssteuerfähigkeiten des Steuersystems **12** ergänzt werden. Es wird darauf hingewiesen, dass die verschiedenen Finger **14** an einer gegebenen Hand **24** (siehe **Fig. 2**) gleichzeitig unter Verwendung unterschiedlicher Controller oder Steuergesetze gesteuert werden können, z. B. mit einer kraftbasierten Steuerung eines Fingers und einer positionsbasierten Steuerung eines anderen.

[0057] Ein selektiver Nachgiebigkeitswert (Pfeil **57**) kann als $k(f - f_d)s$ definiert sein, wobei k eine skalare Konstante ist und $(f - f_d)$ der Spannungsfehler ist. Der Ausdruck s ist eine Wahlvariable mit einem Element für jede Sehne, z. B. mit einem Wert von 1, um die Nachgiebigkeit einzuschalten, und 0, um die Nachgiebigkeit auszuschalten. Folglich kann der selektive Nachgiebigkeitswert **57** unterstromig des Stellgliedcontrollers **90** von der Ausgabe **51** des Stellgliedcontrollers subtrahiert werden, wobei s vom Steuersys-

tem **12** in einer Weise gewählt wird, die davon abhängt, ob die selektive Nachgiebigkeit gewünscht ist (d. h. 1) oder nicht gewünscht ist (d. h. 0). Die Steuersignale (Pfeil **55**), die auch in **Fig. 1** gezeigt sind, werden schließlich an den Roboter **11** als ein Motorbefehl übertragen, der die Gelenkpositionen (q) (Pfeil **31**), die Sehnenpositionen (x) (Pfeil **33**) und die Sehnenspannungen (f) (Pfeil **37**) zurückmeldet.

[0058] Wenn in einem gegebenen Finger **14** alle Spannungssensoren verfügbar sind, verwendet das Steuersystem **12** von **Fig. 1** das kraftbasierte Steuergesetz zum Steuern dieses speziellen Fingers. Das folgende beispielhafte Steuergesetz entkoppelt die Bewegung im Gelenkraum des Fingers **14**. Es gilt die folgende Gleichung für eine gewünschte Sehnenposition (x_d):

$$x_d = x - k_d \dot{x} - P^T K_p (\underline{T} - \underline{T}_d),$$

wobei $\underline{T} = Pf$, und P eine Matrix ist, die R und w^T miteinander verknüpft. Die Werte k_p und k_d sind anwenderdefinierte proportionale bzw. integrale Verstärkungen.

[0059] Mit Bezug auf **Fig. 6** und mit Bezugnahme auf die in den vorhergehenden Figuren gezeigte Struktur beginnt das vorliegende Verfahren **100** gemäß einer möglichen Ausführungsform bei Schritt **102**, bei dem das Steuersystem **12** die Anzahl verfügbarer Spannungssensoren in einem Finger **14**, der gesteuert wird, bestimmt. Schritt **102** kann umfassen, dass ein Eingangssignal empfangen wird, das den Status jedes der Spannungssensoren **58** in einem gegebenen Finger **14** anzeigt, z. B. indem die Spannungssensoren automatisch mit einem Statusanfragebefehl oder einem "Ping" abgefragt werden und immer dann ein Status aufgezeichnet wird, der anzeigt, dass der Spannungssensor verfügbar ist, d. h. online und korrekt funktionierend, wenn der abgefragte Spannungssensor auf den Ping erfolgreich antwortet.

[0060] Alternativ können vom Spannungssensor **58** in kalibrierten Intervallen Signale periodisch übertragen werden, wobei die Unterbrechung oder fehlende Fortsetzung der Übertragung derartiger Signale die Nichtverfügbarkeit eines speziellen Sensors anzeigt. Zusätzliche Ausführungsformen können umfassen, dass der Spannungssensor **58** fehlerhafte Werte relativ zu kalibrierten Schwellenwerten liest, dass eine manuelle Eingabe des Nichtverfügbarkeitsstatus eines gegebenen Sensors in das Steuersystem **12** durch einen Programmierer oder Anwender aufgezeichnet wird, dass Sensorfehlercodes oder -merker verarbeitet werden usw.

[0061] Bei Schritt **104** bestimmt das Steuersystem **12** von **Fig. 1**, ob alle Spannungssensoren **58** für einen speziellen Finger **14** verfügbar sind, z. B. indem eine bekannte Gesamtanzahl von Spannungssenso-

ren mit der Anzahl verfügbarer Sensoren verglichen wird, die bei Schritt **102** bestimmt wurde. Wenn alle Spannungssensoren **58** für einen Finger **14** verfügbar sind, geht das Verfahren **100** zu Schritt **108** weiter. Andernfalls geht das Verfahren **100** zu Schritt **106** weiter.

[0062] Bei Schritt **106** bestimmt das Steuersystem **12**, ob zumindest einige der Spannungssensoren **58** für den Finger **14**, der bewertet wird, verfügbar sind. Wenn dies zutrifft, geht das Verfahren **100** zu Schritt **110** weiter. Andernfalls geht das Verfahren **100** zu Schritt **112** weiter.

[0063] Nachdem das Steuersystem **12** bei Schritt **104** zuvor bestimmt hat, dass alle der Gesamtanzahl von Spannungssensoren **58** in einem Finger **14** zur Verwendung in diesem Finger verfügbar sind, steuert das Steuersystem von **Fig. 1** bei Schritt **108** den Finger, indem es alleine das kraftbasierte Steuergesetz verwendet, wie vorstehend offengelegt ist. Das Verfahren **100** wiederholt dann Schritt **102** in einer Schleife, um zu bestimmen, ob es eine Veränderung bei der Anzahl verfügbarer Spannungssensoren **58** gegeben hat.

[0064] Nachdem das Steuersystem **12** bei Schritt **106** bestimmt hat, dass nur einige der Spannungssensoren **58** in einem gegebenen Finger **14** zur Verwendung in diesem Finger verfügbar sind, steuert das Steuersystem von **Fig. 1** bei Schritt **110** den Finger unter Verwendung des positionsbasierten Steuergesetzes in Verbindung mit der selektiven Nachgiebigkeit, wie vorstehend offengelegt ist. Das Verfahren **100** wiederholt dann Schritt **102** in einer Schleife, um zu bestimmen, ob es eine Veränderung bei der Anzahl verfügbarer Spannungssensoren **58** gegeben hat.

[0065] Nachdem das Steuersystem **12** von **Fig. 1** bei Schritt **106** bestimmt hat, dass keiner der Spannungssensoren **58** zur Verwendung in dem Finger **14** verfügbar ist, der gesteuert wird, steuert das Steuersystem von **Fig. 1** bei Schritt **112** den Finger unter Verwendung allein des positionsbasierten Steuergesetzes, wie vorstehend offengelegt ist. Das Verfahren **100** wiederholt dann Schritt **102** in einer Schleife, um zu bestimmen, ob es eine Veränderung bei der Anzahl verfügbarer Spannungssensoren **58** gegeben hat.

[0066] Folglich stellt das Steuersystem **12** von **Fig. 1** eine Kraftsteuerung, um die Sehnen eines gegebenen Fingers **14** zu schützen, in Kombination mit einer Robustheit mit Bezug auf den Ausfall von Spannungssensoren bereit. Eine effektive Kontrolle über jeden Finger **14** wird bereitgestellt, ohne dass eine Spannungserfassung erforderlich ist. Wenn die Spannungserfassung nicht verfügbar ist, stellt das Steuergesetz mit seiner zweistufigen Steuerarchitek-

tur, die vorstehend mit Bezug auf **Fig. 5** beschrieben ist, eine Positionssteuerung bereit, die schnell und ohne Überspringen ist, während Nennniveaus der internen Spannung an dem Finger aufrecht erhalten werden. In Verbindung mit der Positionssteuerung ist eine Nachgiebigkeit verfügbar, um die Sehnen zu schützen, selbst wenn ein vollständiger Satz von Spannungssensoren nicht verfügbar ist. Somit ist der Roboter **11** von **Fig. 1** in der Lage, auf einem höheren Leistungsniveau mit verbesserter Robustheit zu arbeiten.

[0067] 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. Robotersystem, umfassend:
 - einen von einer Sehne getriebenen Roboterfinger; und
 - ein Steuersystem umfassend einen Spannungssensor und eine Hostmaschine, wobei das Steuersystem ausgestaltet ist, um zu bestimmen, ob ein Spannungssensor zum Messen eines Spannungswerts der Sehne in dem Roboterfinger verfügbar ist, um den Finger selektiv über ein kraftbasiertes Steuergesetz zu steuern, wenn ein Spannungssensor im Finger verfügbar ist, und über ein positionsbasiertes Steuergesetz zu steuern, wenn der Spannungssensor im Finger nicht verfügbar ist, um den Spannungswert zu messen.
2. Robotersystem nach Anspruch 1, ferner eine Vielzahl der Sehnen umfassend, wobei jede Sehne einen entsprechenden Spannungssensor aufweist, wobei das Steuersystem ausgestaltet ist, um den Finger selektiv über das kraftbasierte Steuergesetz, wenn alle Spannungssensoren verfügbar sind, und über das positionsbasierte Steuergesetz, wenn keiner der Spannungssensoren verfügbar ist, zu steuern.
3. Robotersystem nach Anspruch 2, wobei das Steuersystem ferner ausgestaltet ist, um selektiv einen Nachgiebigkeitswert in das positionsbasierte Steuergesetz einzugeben, wenn nur einige der Spannungssensoren verfügbar sind.
4. Robotersystem nach Anspruch 3, wobei der Nachgiebigkeitswert eine Funktion eines Spannungsfehlers ist, der als eine Differenz zwischen einer gewünschten Spannung und einer tatsächlichen Spannung einer der Sehnen bestimmt wird.
5. Robotersystem nach Anspruch 1,

ferner ein Stellglied zum Bewegen der Sehne umfassend, wobei das Steuersystem eine zweistufige Architektur oder Hierarchie verwendet, bei der ein Gelenkcontroller einen oberen Steuerkreis bildet und ein Stellgliedcontroller einen unteren Steuerkreis in der zweistufigen Architektur bildet, und wobei:

der Gelenkcontroller ausgestaltet ist, um das kraftbasierte Steuergesetz und das positionsbasierte Steuergesetz auszuführen, um dadurch jeweils die Kraft und die Position der Gelenke des Roboterfingers zu steuern; und

der Stellgliedcontroller ausgestaltet ist, um nur das positionsbasierte Steuergesetz auszuführen, um dadurch die Position des Stellglieds zu steuern.

6. Robotersystem nach Anspruch 5, wobei beliebige befohlene Stellgliedpositionen für das Stellglied, die an den Stellgliedcontroller hinabgesandt werden, auf den Zielraum des Fingers beschränkt sind.

7. Robotersystem nach Anspruch 1, das ferner eine Hand mit einer Vielzahl der Finger umfasst, wobei jeder Finger eine Vielzahl der Sehnen aufweist, und wobei jede Sehne einen entsprechenden Spannungssensor aufweist, wobei jeder Finger mit Bezug auf die anderen Finger in einer Weise unabhängig steuerbar ist, die von der Anzahl verfügbarer Spannungssensoren in dem Finger abhängt, der unabhängig gesteuert wird.

8. Robotersystem nach Anspruch 1, ferner ein Stellglied zum Bewegen der Sehne umfassend, wobei das Steuersystem eine zweistufige Architektur mit einem unteren und einem oberen Steuerkreis verwendet, und wobei der untere Steuerkreis eine Stellgliedposition des Fingers aktiv einstellt, um zu ermöglichen, dass der Finger einer Bewegung im Nullraum einer Sehnenabbildungsmatrix für den Finger widersteht, während auch eine anfängliche interne Spannung an der Sehne nominell beibehalten wird.

9. Steuersystem für einen von einer Sehne getriebenen Roboterfinger, wobei das Steuersystem umfasst:

eine Hostmaschine; und

ein nicht transitorisches computerlesbares Medium, auf dem ein Steuerprozess aufgezeichnet ist, der eine zweistufige Steuerarchitektur zum Steuern des Fingers bereitstellt;

wobei die Hostmaschine ausgestaltet ist, um den Steuerprozess auszuführen, um dadurch die Verfügbarkeit eines Spannungssensors, der zum Messen eines Spannungswerts geeignet ist, in dem Finger zu bestimmen, und um den Finger:

über ein kraftbasiertes Steuergesetz, wenn der Spannungssensor zum Messen des Spannungswerts verfügbar ist; und

über ein positionsbasiertes Steuergesetz, wenn der Spannungssensor zum Messen des Spannungswerts nicht verfügbar ist, selektiv zu steuern.

10. Steuersystem nach Anspruch 9, wobei der Finger eine Vielzahl von Sehnen enthält, die jeweils einen entsprechenden Spannungssensor aufweisen, und wobei die Hostmaschine ausgestaltet ist, um den Finger selektiv über das kraftbasierte Steuergesetz, wenn alle der Vielzahl von Spannungssensoren im Finger verfügbar sind, und über das positionsbasierte Steuergesetz, wenn keiner der Vielzahl von Spannungssensoren verfügbar ist, zu steuern.

Es folgen 4 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

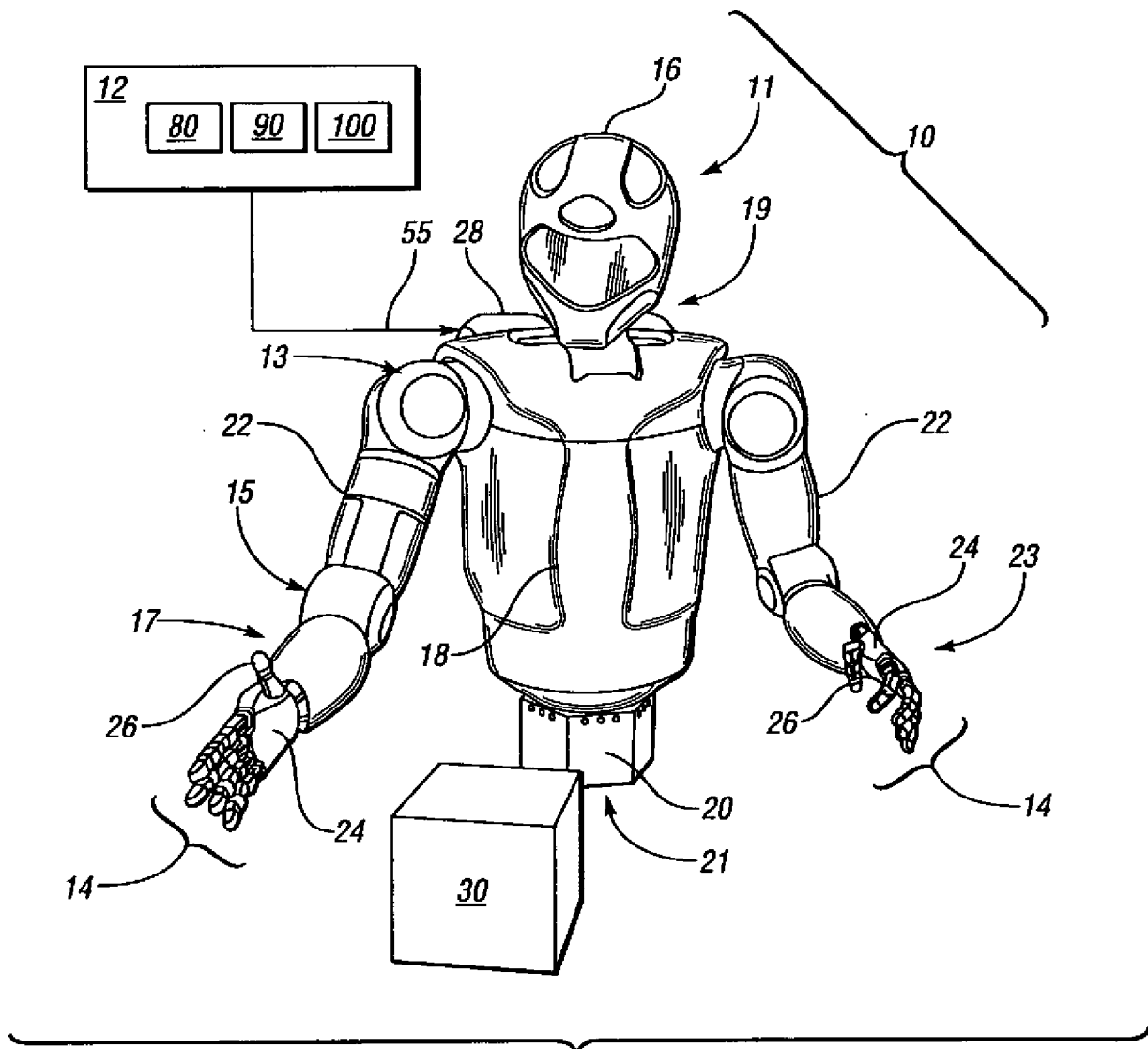
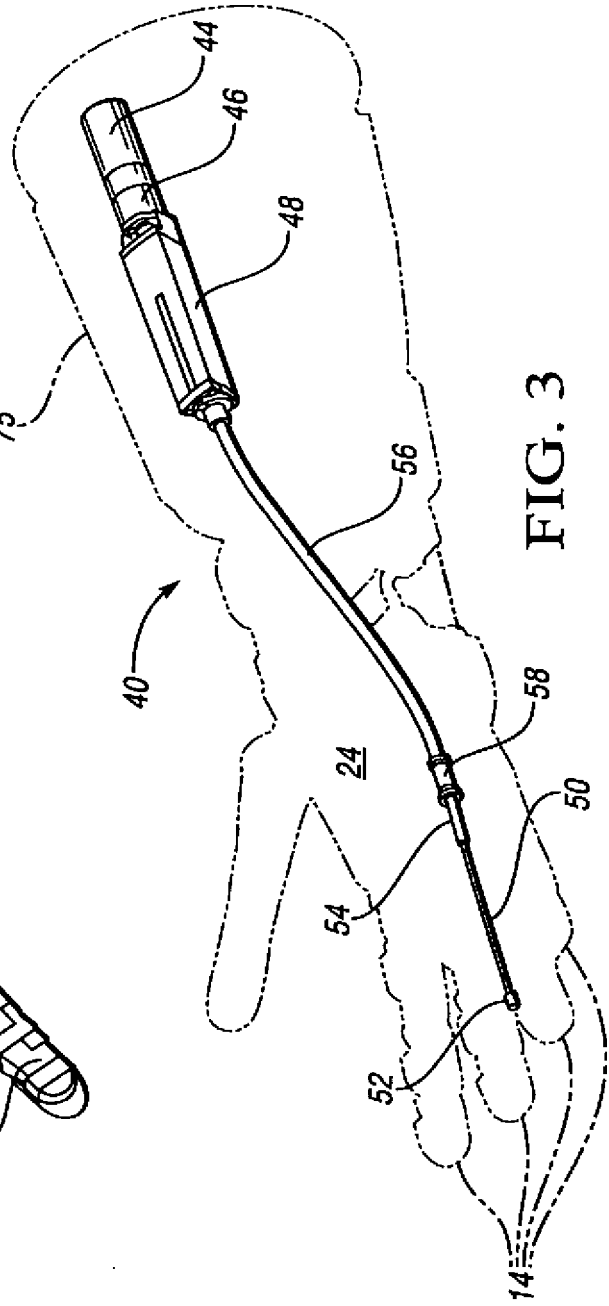
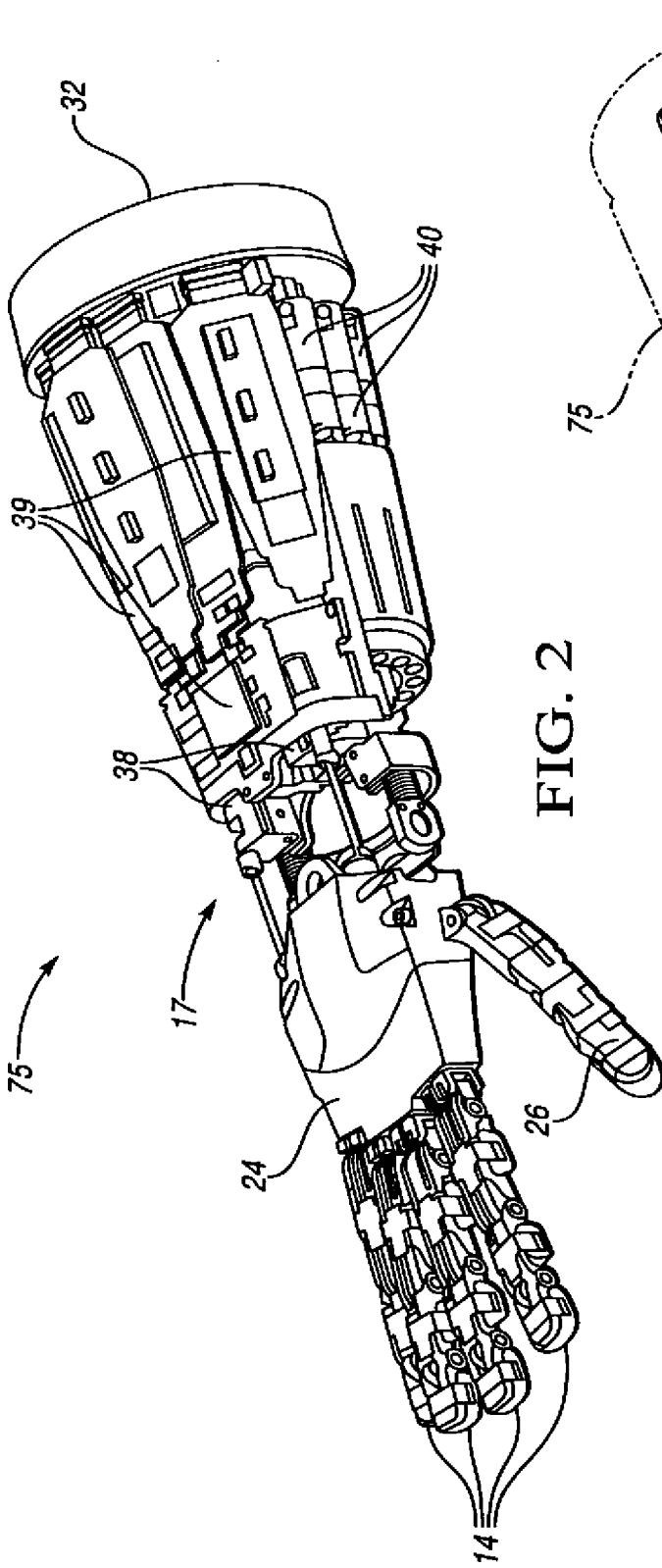
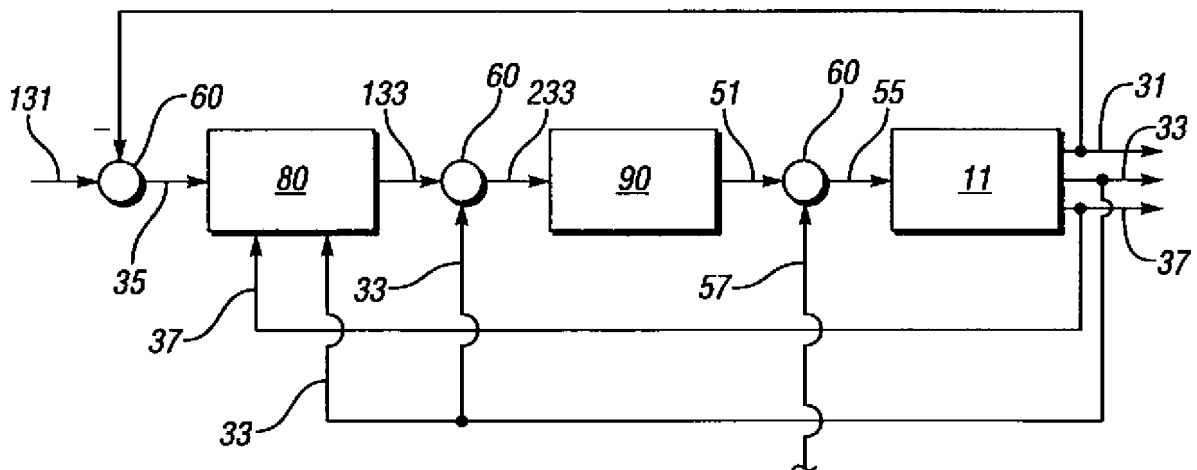
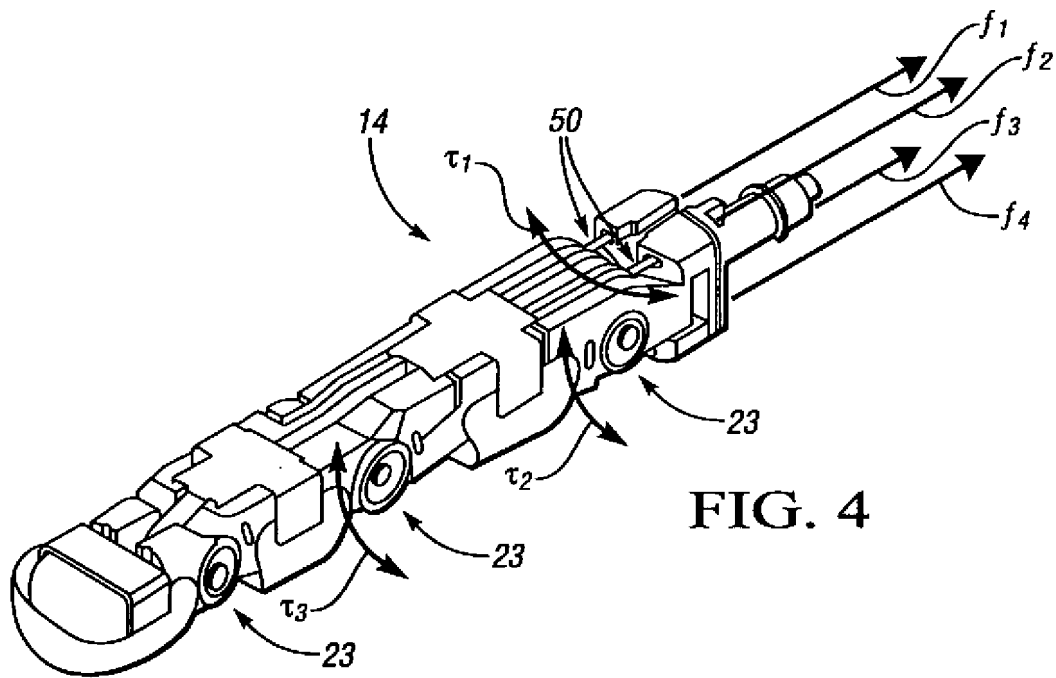


FIG. 1





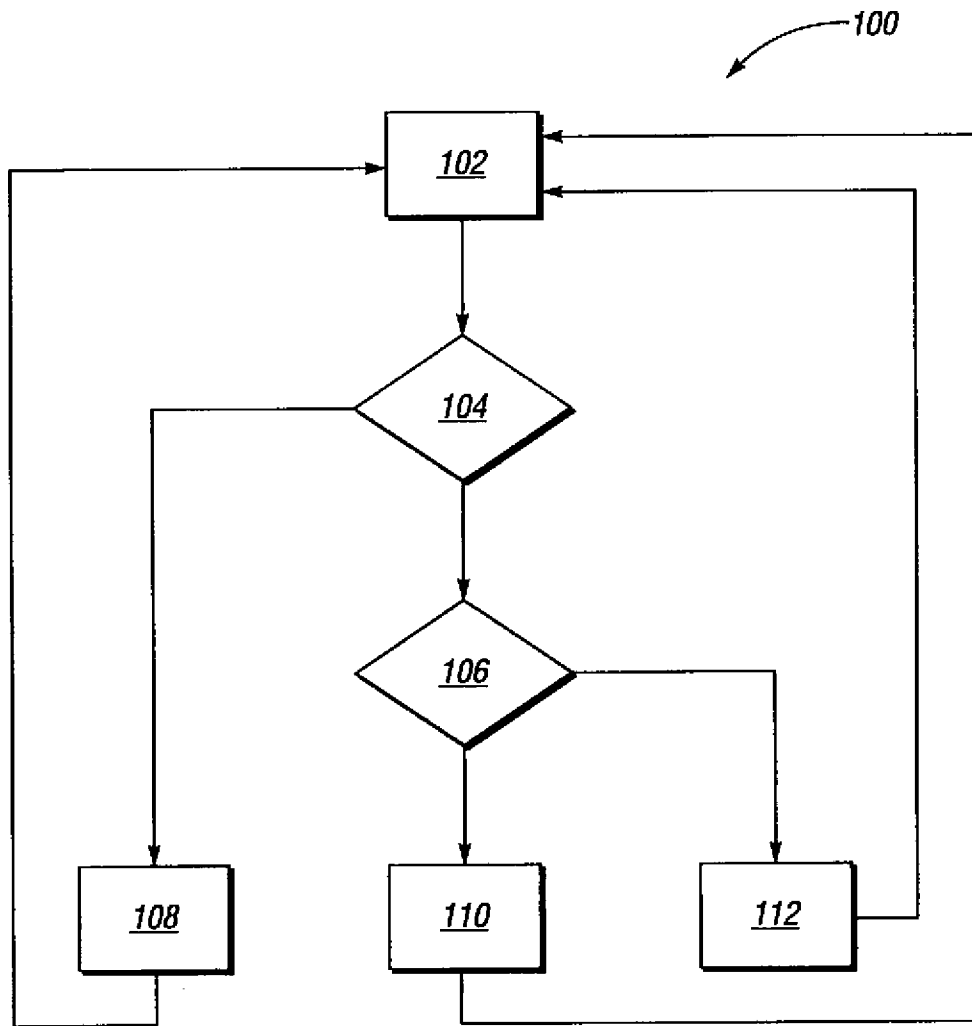


FIG. 6