Verfahren zum Ermitteln einer Gewichtskraft und eines Schwerpunktes einer Robotermanipulatorlast

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Ermitteln einer Gewichtskraft und eines Schwerpunktes einer Last für einen Robotermanipulator und ein System zum Ermitteln einer Gewichtskraft und eines Schwerpunktes einer Last für einen Robotermanipulator.

Aufgabe der Erfindung ist es, eine Gewichtskraft und einen Schwerpunkt einer Last für einen Robotermanipulator zu ermitteln.

Die Erfindung ergibt sich aus den Merkmalen der unabhängigen Ansprüche. Vorteilhafte Weiterbildungen und Ausgestaltungen sind Gegenstand der abhängigen Ansprüche.

Ein erster Aspekt der Erfindung betrifft ein Verfahren zum Ermitteln einer Gewichtskraft und eines Schwerpunktes einer Last für einen Robotermanipulator. Der Robotermanipulator ist an einer Basis angeordnet und weist eine Vielzahl von Gliedern auf. Die Glieder sind miteinander durch Gelenke verbunden. An den Gelenken sind Aktuatoren angeordnet, um die jeweiligen an einem der Gelenke angeordneten Glieder gegeneinander zu verdrehen oder zu verkippen. Der Robotermanipulator weist außerdem einen Endeffektor zum Greifen der Last auf. Das Verfahren gemäß dem ersten Aspekt der Erfindung weist die folgenden Schritte auf:

- Greifen der Last mit dem Endeffektor,
- Verfahren der Last in eine Zahl *n* paarweise verschiedene statische Posen,
- Ermitteln eines jeweiligen externen Kraftwinders F_{ext} für jede der *n* statischen Posen, wobei der jeweilige externe Kraftwinder F_{ext} externe auf den Robotermanipulator wirkende Kräfte und Momente angibt,
- Ermitteln zumindest der die externen Kräfte angebenden Komponenten des jeweiligen externen Kraftwinders F_{ext} in einem Basiskoordinatensystem, wobei das Basiskoordinatensystem ein kartesisches Koordinatensystem ist und gedacht körperfest an der Basis des Robotermanipulators angeordnet ist und wobei eine Achse des Basiskoordinatensystems parallel zu einem Schwerkraftvektor ist,
- Ermitteln einer jeweiligen Schätzung für die Gewichtskraft der Last für jede der *n* statischen Posen aus der jeweiligen in Richtung des Schwerkraftvektors zeigenden Komponente der in dem Basiskoordinatensystem die externen Kräfte angebenden Komponenten des jeweiligen externen Kraftwinders F_{ext},

- Ermitteln der Gewichtskraft der Last durch Mitteln der jeweiligen Schätzungen für die Gewichtskraft der Last,
- Ermitteln von Schätzungen von Koordinaten des Schwerpunktes der Last für jede der *n* statischen Posen auf Basis der Gewichtskraft der Last oder der für die jeweilige statische Pose ermittelten jeweiligen Schätzung für die Gewichtskraft der Last und auf Basis der die extern wirkenden Momente angebenden Komponenten des externen Kraftwinders F_{ext}, und
- Ermitteln des Schwerpunktes der Last durch Mitteln der jeweiligen Schätzungen von Koordinaten des Schwerpunktes.

Eine Orientierung des Basiskoordinatensystems wird zumindest so ausgerichtet, dass eine Achse des Basiskoordinatensystems in Richtung des lokalen Schwerkraftvektors zeigt. Das Basiskoordinatensystem wird bevorzugt beim Aufstellen des Robotermanipulators dementsprechend kalibriert. Dem Ermitteln zumindest der die externen Kräfte angebenden Komponenten des jeweiligen externen Kraftwinders F_{ext} in dem Basiskoordinatensystem steht es insbesondere gleich, durch entsprechende Koordinatensystemtransformation den externen Kraftwinder F_{ext} so zu transformieren, dass genau eine Kraft angebende Komponente des externen Kraftwinders F_{ext} genau in Richtung des lokalen Schwerkraftvektors definiert ist, denn in diesem Fall ist ebenfalls ein entlang des Schwerkraftvektors orientiertes Basiskoordinatensystem implizit definiert. Der lokale Schwerkraftvektor ist derjenige Vektor, der insbesondere die Richtung der am gegebenen Ort auf der Erde wirkenden Schwerkraft angibt.

Eine statische Pose wird für einen gewissen Zeitraum beibehalten. Dies ermöglicht eine statische Messung von Kräften und Momenten, ohne die Notwendigkeit, auch dynamische Kräfte und Momente wie Corioliskräfte, tangentiale Beschleunigungen oder Fliehkräfte zu erfassen. Im jeweiligen externen Kraftwinder F_{ext} für die statischen Posen sind daher ebenfalls keine dynamischen Kräfte und Momente enthalten. Der externe Kraftwinder F_{ext} weist bezüglich der statischen Posen alle externen Kraft- und Momenteneinflüsse auf, zu denen auch die Gewichtskraft der Last gehört. Nicht enthalten im externen Kraftwinder F_{ext} ist dagegen die Gewichtskraft des Robotermanipulators einschließlich des Endeffektors. Die Konsequenz daraus ist, dass in einer statischen Pose des Robotermanipulators ohne eine im Endeffektor aufgenommene Last der externe Kraftwinder F_{ext} einem Nullvektor entspricht.

Der Schwerpunkt ist ein punktförmiger Ort, das heißt beim Ermitteln des Schwerpunktes wird ein Ortsvektor zu diesem punktförmigen Ort, dem Schwerpunkt, ermittelt. Der

Anfangspunkt dieses Ortsvektors liegt dabei insbesondere im Ursprung des jeweiligen Koordinatensystems, in dem dieser Ortsvektor angegeben wird.

Beim Ermitteln der Gewichtskraft der Last wirkt der Robotermanipulator selbst vorteilhaft als Waage, um die Gewichtskraft der Masse der Last zu ermitteln. Dabei steht das Ermitteln einer Gewichtskraft dem Ermitteln der Masse völlig gleich, da Gewichtskraft und Masse der Last über den Ortsfaktor $g \triangleq 9{,}8\ m/s^2$ miteinander verbunden sind.

Es ist eine vorteilhafte Wirkung der Erfindung, dass eine Gewichtskraft und ein Schwerpunkt einer Last für einen Robotermanipulator effizient ermittelt werden können.

Gemäß einer vorteilhaften Ausführungsform erfolgt das Verfahren der Last in eine Zahl n paarweise verschiedene statische Posen lediglich durch Ansteuerung von k Aktuatoren, mit $k \leq n$, wobei die Zahl k eine vordefinierte Anzahl ist und die k Aktuatoren an den k von dem Endeffektor nächst gelegenen Gelenken angeordnet bzw. zugeordnet sind. Gemäß einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform gilt $k = 3$ und das Verfahren der Last erfolgt in eine Zahl n paarweise verschiedene statische Posen lediglich durch Ansteuerung von drei Aktuatoren der dem Endeffektor nächst gelegenen drei Gelenken. Gemäß einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform gilt $k = 2$ und das Verfahren der Last erfolgt in eine Zahl n paarweise verschiedene statische Posen lediglich durch Ansteuerung von zwei Aktuatoren der zwei dem Endeffektor nächst gelegenen Gelenken. Vorteilhaft wird der Schritt des Verfahrens der Last jeweils dadurch nur auf einem sehr kleinen Raumabschnitt ausgeführt.

Gemäß einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform erfolgt das Verfahren der Last in eine Zahl n paarweise verschiedene statische Posen lediglich durch Ansteuerung von k Aktuatoren, mit $k \leq n$, wobei die Zahl k eine vordefinierte Anzahl ist.

Vorteilhaft gilt $k = 2$ und das Verfahren der Last in eine Zahl n paarweise verschiedene statische Posen erfolgt lediglich durch Ansteuerung des ersten Aktuators und des dritten Aktuators der drei dem Endeffektor nächst gelegenen Gelenken.

Gemäß einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform werden die Schritte zum Ermitteln einer Gewichtskraft und eines Schwerpunktes einer Last für einen Robotermanipulator auf das Eingabesignal eines Anwenders hin automatisch ausgeführt.

Gemäß einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform werden die *n* statischen Posen automatisch von dem Robotermanipulator abgefahren und einer anderen Bewegung überlagert, wobei die andere Bewegung bevorzugt ein manuelles Führen des Robotermanipulators ist.

Gemäß einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform werden die Schritte zum Ermitteln einer Gewichtskraft und eines Schwerpunktes einer Last für einen Robotermanipulator während eines manuellen Führens des Robotermanipulators durchgeführt. Die statischen Posen werden dabei entsprechend bei Verfügbarkeit automatisch ausgewählt.

Gemäß einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform wird der externe Kraftwinder F_{ext} durch Drehmomentsensoren in den Gelenken ermittelt.

Die Drehmomentsensoren sind vorteilhaft in elektrische Aktuatoren der aktuatorisch rotierbaren Gelenke integriert. Insbesondere über die Messung des elektrischen Stromes in elektrischen Aktuatoren sind dort Drehmomente erfassbar.

Gemäß einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform wird der externe Kraftwinder F_{ext} mittels Dehnmessstreifen an den Gelenken oder an den Gliedern ermittelt.

Gemäß einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform wird die Last in eine Zahl *m* der *n* statischen Posen, mit $m \leq n$, mehrfach aus paarweise verschiedenen Richtungen verfahren.

Vorteilhaft können hierdurch Hystereseeffekte aus den jeweiligen Kraft- oder Momentensensoren ausgemittelt werden und somit aus den Messungen des externen Kraftwinders F_{ext} eliminiert werden. Die Hystereseeffekte stammen insbesondere aus Reibung und Trägheit des Systems „Robotermanipulator“. Je nachdem, aus welcher Richtung eine solche Pose angefahren wird, werden von den jeweiligen Kraft- oder Momentensensoren unterschiedliche Werte gemessen. Wird dementsprechend aus verschiedenen Richtungen symmetrisch in die gewünschte Pose verfahren, erlaubt dies, den durch den jeweiligen Hystereseeffekt verursachten Messfehler bei der Erfassung des externen Kraftwinders F_{ext} zu eliminieren.

Gemäß einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform gilt: n=8.

Gemäß einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform erfolgt das Ermitteln eines jeweiligen externen Kraftwinders F_{ext} für jede der *n* statischen Posen in einem zum Endeffektor körperfesten Endeffektorkoordinatensystem und zum Ermitteln zumindest der die Kräfte angebenden Komponenten des jeweiligen externen Kraftwinders F_{ext} in dem Basiskoordinatensystem erfolgt eine Systemtransformation zwischen dem Endeffektorkoordinatensystem und dem Basiskoordinatensystem.

Gemäß einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform erfolgt das Ermitteln von Schätzungen für Koordinaten des Schwerpunktes der Last für jede der *n* statischen Posen in einem zum Endeffektor körperfesten Endeffektorkoordinatensystem.

Das Endeffektorkoordinatensystem ist gedacht körperfest am Endeffektor angeordnet. Bei einer Bewegung des Endeffektors dreht sich daher das Endeffektorkoordinatensystem zusammen mit dem Endeffektor mit. Das Endeffektorkoordinatensystem weist daher keine Relativbewegung gegenüber dem Endeffektor auf.

Gemäß einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform erfolgt das Ermitteln des Schwerpunktes der Last durch arithmetisches Mitteln der jeweiligen Schätzungen für die Koordinaten des Schwerpunktes der Last.

Gemäß einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform erfolgt das Ermitteln der Gewichtskraft der Last durch arithmetisches Mitteln der jeweiligen Schätzungen für die Gewichtskraft der Last.

Gemäß einer vorteilhaften Ausführungsform weist das Verfahren weiterhin den Schritt auf:
- Anpassen eines Regelungssystems des Robotermanipulators auf Basis der Gewichtskraft der Last und/oder des Schwerpunkts der Last.

Gemäß einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform erfolgt das Anpassen des Regelungssystems durch Anpassen zumindest eines Regelungsparameters.

Ein Regelungsparameter ist insbesondere eine Rückführverstärkung, eine Vorwärtszweigverstärkung, oder eine modellierte Totzeit.

Gemäß einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform weist das Verfahren weiterhin den Schritt auf:

- Planen und Ausführen eines Bewegungspfades der Last und einer jeweiligen Pose der Last während des Abfahrens des Bewegungspfades unter Berücksichtigung des Schwerpunktes der Last, sodass ein zumindest auf das Endeffektorgelenk wirkendes Moment reduziert wird.

Gemäß einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform weist das Verfahren weiterhin den Schritt auf:
- Ermitteln einer maximalen Bahngeschwindigkeit der Last auf Basis der Masse, sodass ein vorgegebener maximaler translatorischer Impuls der Last nicht überschritten wird.

Gemäß einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform weist das Verfahren auf:
- Ermitteln einer maximalen Rotationsgeschwindigkeit der Last auf Basis des Schwerpunkts der Last und/oder der Masse der Last, sodass ein vorgegebener maximaler Drehimpuls der Last nicht überschritten wird.

Ein weiterer Aspekt der Erfindung betrifft ein System zum Ermitteln einer Gewichtskraft und eines Schwerpunktes einer Last für einen Robotermanipulator, wobei der Robotermanipulator an einer Basis angeordnet ist und eine Vielzahl von Gliedern aufweist und die Glieder durch Gelenke miteinander verbunden und durch an den Gelenken angeordnete Aktuatoren gegeneinander rotierbar sind und wobei der Robotermanipulator aufweist:
- einen Endeffektor, der zum Greifen der Last ausgeführt ist,
- eine Steuereinheit, die dazu ausgeführt ist, die an den Gelenken angeordneten Aktuatoren zum Verfahren der Last in eine Zahl *n* paarweise verschiedene statische Posen anzusteuern,
- eine Schätzeinheit, die dazu ausgeführt ist, einen jeweiligen externen Kraftwinder F_{ext} für jede der *n* statischen Posen zu ermitteln, wobei der jeweilige externe Kraftwinder F_{ext} externe auf den Robotermanipulator wirkende Kräfte und Momente angibt,
- eine Recheneinheit, die dazu ausgeführt ist,
a) zumindest die die Kräfte angebenden Komponenten des jeweiligen externen Kraftwinders F_{ext} in einem Basiskoordinatensystem anzugeben, wobei das Basiskoordinatensystem ein kartesisches Koordinatensystem ist und körperfest an der Basis des Robotermanipulators angeordnet ist und eine Achse des Basiskoordinatensystems parallel zu einem Schwerkraftvektor ist,
b) eine jeweilige Schätzung für die Gewichtskraft der Last aus der jeweiligen in Richtung des Schwerkraftvektors zeigenden Komponente der in dem Basiskoordinatensystem die

externen Kräfte angebenden Komponenten des jeweiligen externen Kraftwinders F_{ext} und aus dem Betrag des Schwerkraftvektors zu ermitteln,
c) eine Gewichtskraft der Last durch Mitteln der jeweiligen Schätzungen für die Gewichtskraft der Last zu ermitteln,
d) Schätzungen für Koordinaten des Schwerpunktes der Last für jede der *n* statischen Posen auf Basis der Gewichtskraft der Last oder der für die jeweilige statische Pose ermittelten jeweiligen Schätzung der Gewichtskraft der Last und auf Basis der die extern wirkenden Momente angebenden Komponenten des externen Kraftwinders F_{ext} zu ermitteln, und
e) den Schwerpunkt der Last durch Mitteln der jeweiligen Schätzungen für Koordinaten des Schwerpunktes zu ermitteln.

Gemäß einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform weist der Robotermanipulator Drehmomentsensoren auf, die dazu ausgeführt sind, Momente in den Gelenken zu ermitteln, wobei die Recheneinheit dazu ausgeführt ist, aus den Momenten in den Gelenken den externen Kraftwinder F_{ext} zu ermitteln.

Die Drehmomentsensoren sind vorteilhaft in elektrische Aktuatoren der Gelenke integriert. Insbesondere über die Messung des elektrischen Stromes in elektrischen Aktuatoren sind dort Drehmomente erfassbar.

Gemäß einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform weist der Robotermanipulator Dehnmessstreifen an den Gelenken oder an den Gliedern auf, wobei die Dehnmessstreifen jeweils dazu ausgeführt sind, Spannungen im tragenden Material des Robotermanipulators zu erfassen und an die Recheneinheit zu übermitteln, wobei die Recheneinheit dazu ausgeführt ist, aus den erfassten Spannungen den externen Kraftwinder F_{ext} zu ermitteln.

Gemäß einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform ist die Steuereinheit dazu ausgeführt, die an den Gelenken angeordneten Aktuatoren zum Verfahren der Last in eine Zahl *m* der *n* statischen Posen, mit $m \leq n$, aus paarweise verschiedenen Richtungen anzusteuern.

Gemäß einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform ist die Recheneinheit dazu ausgeführt, den jeweiligen externen Kraftwinder F_{ext} für jede der *n* statischen Posen in einem zum Endeffektor körperfesten Endeffektorkoordinatensystem zu ermitteln und zum Ermitteln zumindest der die Kräfte angebenden Komponenten des jeweiligen externen

Kraftwinders F_{ext} in dem Basiskoordinatensystem eine Systemtransformation zwischen dem Endeffektorkoordinatensystem und dem Basiskoordinatensystem durchzuführen.

Gemäß einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform ist die Recheneinheit dazu ausgeführt, das Ermitteln von Schätzungen für Koordinaten des Schwerpunktes der Last für jede der *n* statischen Posen in einem zum Endeffektor körperfesten Endeffektorkoordinatensystem auszuführen.

Gemäß einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform ist die Recheneinheit dazu ausgeführt, das Ermitteln des Schwerpunktes der Last durch arithmetisches Mitteln der jeweiligen Schätzungen für die Koordinaten des Schwerpunktes der Last auszuführen.

Gemäß einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform ist die Recheneinheit dazu ausgeführt, das Ermitteln der Gewichtskraft der Last durch arithmetisches Mitteln der jeweiligen Schätzungen für die Gewichtskraft der Last auszuführen.

Vorteile und bevorzugte Weiterbildungen des vorgeschlagenen Systems ergeben sich durch eine analoge und sinngemäße Übertragung der im Zusammenhang mit dem vorgeschlagenen Verfahren vorstehend gemachten Ausführungen.

Weitere Vorteile, Merkmale und Einzelheiten ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung, in der – gegebenenfalls unter Bezug auf die Zeichnung – zumindest ein Ausführungsbeispiel im Einzelnen beschrieben ist. Gleiche, ähnliche und/oder funktionsgleiche Teile sind mit gleichen Bezugszeichen versehen.

Es zeigen:

Fig. 1 ein Verfahren zum Ermitteln einer Gewichtskraft und eines Schwerpunktes einer Last für einen Robotermanipulator gemäß einem Ausführungsbeispiel der Erfindung,

Fig. 2 ein System zum Ermitteln einer Gewichtskraft und eines Schwerpunktes einer Last für einen Robotermanipulator gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel der Erfindung, und

Fig. 3 symbolisch dargestellte statische Posen ergänzend zu dem in Fig. 1 erläuterten Verfahren.

Die Darstellungen in den Figuren sind schematisch und nicht maßstäblich.

Fig. 1 zeigt ein Verfahren zum Ermitteln einer Gewichtskraft und eines Schwerpunktes einer Last 11 für einen Robotermanipulator 1, wobei der Robotermanipulator 1 an einer Basis 3 angeordnet ist und eine Vielzahl von Gliedern 5 aufweist und die Glieder 5 durch Gelenke 7 miteinander verbunden und durch Aktuatoren 6 an den Gelenken 5 gegeneinander rotierbar sind, und wobei der Robotermanipulator 1 einen Endeffektor 9 zum Greifen der Last 11 aufweist. Das Verfahren weist die folgenden Schritte auf:

- Greifen S1 der Last 11 mit dem Endeffektor 9,
- Verfahren S2 der Last 11 in eine Zahl *n* paarweise verschiedene statische Posen,
- Ermitteln S3 eines jeweiligen externen Kraftwinders F_{ext} für jede der *n* statischen Posen, wobei der jeweilige externe Kraftwinder F_{ext} externe auf den Robotermanipulator 1 wirkende Kräfte und Momente angibt,
- Ermitteln S4 zumindest der die externen Kräfte angebenden Komponenten des jeweiligen externen Kraftwinders F_{ext} in einem Basiskoordinatensystem, wobei das Basiskoordinatensystem ein kartesisches Koordinatensystem ist und körperfest an der Basis 3 des Robotermanipulators 1 angeordnet ist und eine Achse des Basiskoordinatensystems parallel zu einem Schwerkraftvektor ist,
- Ermitteln S5 einer jeweiligen Schätzung für die Gewichtskraft der Last 11 aus der jeweiligen in Richtung des Schwerkraftvektors zeigenden Komponente der in dem Basiskoordinatensystem die externen Kräfte angebenden Komponenten des jeweiligen externen Kraftwinders F_{ext},
- Ermitteln S6 der Gewichtskraft der Last 11 durch Mitteln der jeweiligen Schätzungen für die Gewichtskraft der Last 11,
- Ermitteln S7 von Schätzungen von Koordinaten des Schwerpunktes der Last 11 für jede der *n* statischen Posen auf Basis der Gewichtskraft der Last 11 oder der für die jeweilige statische Pose ermittelten jeweiligen Schätzung der Gewichtskraft der Last 11 und auf Basis der die extern wirkenden Momente angebenden Komponenten des externen Kraftwinders F_{ext}, und
- Ermitteln S8 des Schwerpunktes der Last 11 durch Mitteln der jeweiligen Schätzungen von Koordinaten des Schwerpunktes.

Fig. 2 zeigt ein System 100 zum Ermitteln einer Gewichtskraft und eines Schwerpunktes einer Last 11 für einen Robotermanipulator 1, wobei der Robotermanipulator 1 an einer Basis 3 angeordnet ist und eine Vielzahl von Gliedern 5 aufweist und die Glieder 5 durch

Gelenke 7 miteinander verbunden und durch an den Gelenken 7 angeordnete Aktuatoren 6 gegeneinander rotierbar sind. Der Robotermanipulator 1 weist Folgendes auf:

- Einen Endeffektor 9, der zum Greifen der Last 11 ausgeführt ist,
- eine Steuereinheit 101, die dazu ausgeführt ist, die an den Gelenken 7 angeordneten Aktuatoren 6 zum Verfahren der Last 11 in eine Zahl *n* paarweise verschiedene statische Posen anzusteuern,
- eine Schätzeinheit 103, die dazu ausgeführt ist, einen jeweiligen externen Kraftwinder F_{ext} für jede der *n* statische Posen zu ermitteln, wobei der jeweilige externe Kraftwinder F_{ext} externe auf den Robotermanipulator 1 wirkende Kräfte und Momente angibt und durch Drehmomentsensoren 13 in den Gelenken 7 sowie durch Dehnmessstreifen 15 an den Gliedern 5 ermittelt wird,
- eine Recheneinheit 105, die dazu ausgeführt ist,

a) zumindest die die Kräfte angebenden Komponenten des jeweiligen externen Kraftwinders F_{ext} in einem Basiskoordinatensystem anzugeben, wobei das Basiskoordinatensystem ein kartesisches Koordinatensystem ist und körperfest an der Basis 3 des Robotermanipulators 1 angeordnet ist und eine Achse des Basiskoordinatensystems parallel zu einem Schwerkraftvektor ist,

b) eine jeweilige Schätzung für die Gewichtskraft der Last 11 aus der jeweiligen in Richtung des Schwerkraftvektors zeigenden Komponente der in dem Basiskoordinatensystem die externen Kräfte angebenden Komponenten des jeweiligen externen Kraftwinders F_{ext} und aus dem Betrag des Schwerkraftvektors zu ermitteln,

c) eine Gewichtskraft der Last 11 durch Mitteln der jeweiligen Schätzungen für die Gewichtskraft der Last 11 zu ermitteln,

d) Schätzungen für Koordinaten des Schwerpunktes der Last 11 für jede der *n* statischen Posen auf Basis der Gewichtskraft der Last 11 oder der für die jeweilige statische Pose ermittelten jeweiligen Schätzung der Gewichtskraft der Last 11 und auf Basis der die extern wirkenden Momente angebenden Komponenten des externen Kraftwinders F_{ext} zu ermitteln, und

e) den Schwerpunkt der Last 11 durch Mitteln der jeweiligen Schätzungen für Koordinaten des Schwerpunktes zu ermitteln.

Fig. 3 zeigt ergänzend zum Verfahren der Fig. 1, detaillierter, jedoch symbolisch, die verschiedenen statischen Posen der Last 11. Das Verfahren dient zum Ermitteln einer Gewichtskraft und eines Schwerpunktes einer Last 11 für einen Robotermanipulator 1, wobei der Robotermanipulator 1 an einer Basis 3 angeordnet ist und eine Vielzahl von Gliedern 5 aufweist und die Glieder 5 durch Gelenke 7 miteinander verbunden und durch Aktuatoren 6 an den Gelenken 5 gegeneinander rotierbar sind und wobei der

Robotermanipulator 1 einen Endeffektor 9 zum Greifen der Last 11 aufweist. Nach dem Greifen S1 der Last 11 mit dem Endeffektor 9, erfolgt das Verfahren S2 der Last 11 in eine Zahl *n* paarweise verschiedene statische Posen. Diese verschiedenen statischen Posen sind in Fig. 3 gezeigt. Die Last 11 wird in eine Zahl *m* der *n* statischen Posen, mit $m \leq n$, mehrfach aus paarweise verschiedenen Richtungen verfahren, wobei hier gilt: $m = n = 4$. Die statischen Posen werden mit q_1, q_2, q_3, und q_4 bezeichnet. Für jede dieser statischen Posen erfolgt das Ermitteln S3 eines jeweiligen externen Kraftwinders F_{ext}, wobei der jeweilige externe Kraftwinder F_{ext} externe auf den Robotermanipulator 1 wirkende Kräfte und Momente in einem Endeffektorkoordinatensystem K angibt. In diesem Fall weist der externe Kraftwinder F_{ext} sechs Komponenten auf. Die ersten drei Komponenten des externen Kraftwinders F_{ext} beschreiben hierbei Kräfte, und die sich daran anschließenden drei Komponenten des externen Kraftwinders F_{ext} beschreiben erfasste Momente. Das Ermitteln eines jeweiligen externen Kraftwinders F_{ext} erfolgt für jede der *n* statischen Posen in dem zum Endeffektor 9 körperfesten Endeffektorkoordinatensystem K und zum Ermitteln S4 zumindest der die Kräfte angebenden Komponenten des jeweiligen externen Kraftwinders F_{ext} in einem Basiskoordinatensystem B wird eine Systemtransformation zwischen dem Endeffektorkoordinatensystem K und dem Basiskoordinatensystem B durchgeführt. Das Basiskoordinatensystem B ist ein kartesisches Koordinatensystem und körperfest an der Basis 3 des Robotermanipulators 1 gedacht angeordnet und eine Achse des Basiskoordinatensystems B ist parallel zu dem vor Ort gegebenen Schwerkraftvektor. Hierauf wird ein Ermitteln S5 einer jeweiligen Schätzung für die Gewichtskraft der Last 11 aus der jeweiligen in Richtung des Schwerkraftvektors zeigenden Komponente der in dem Basiskoordinatensystem B die externen Kräfte angebenden Komponenten des jeweiligen externen Kraftwinders F_{ext} durchgeführt:

$$\hat{m}_{q1}g = -{}^{B}\hat{F}_{ext,K,q1}(3);\ \hat{m}_{q2}g = -{}^{B}\hat{F}_{ext,K,q2}(3);$$

$$\hat{m}_{q3}g = -{}^{B}\hat{F}_{ext,K,q3}(3);\ \hat{m}_{q4}g = -{}^{B}\hat{F}_{ext,K,q4}(3);$$

Hierbei bezeichnen der tief gestellte Index 'K' den Bezug der jeweiligen Größe vor dem Index auf das Endeffektorkoordinatensystem K, und das hochgestellte 'B' vor der jeweiligen Größe die Notation im Basiskoordinatensystem B. Ferner bezeichnet g den Betrag des lokal vorherrschenden Schwerkraftvektors. Außerdem gibt der Ausdruck ${}^{B}\hat{F}_{ext,K,q1}(3)$ mittels der Angabe '(3)' die dritte Komponente des vektoriell notierten externen Kraftwinders F_{ext} an, gültig für die jeweilige Pose q_1, bzw. q_2, bzw. q_3, bzw. q_4. Dementsprechend beschreiben die Terme $\hat{m}_{q1}g \ldots \hat{m}_{q4}g$ die jeweiligen Schätzungen für die Gewichtskraft der Masse der Last, für jede der Posen q_1 bis q_4.

Das Ermitteln S6 der Gewichtskraft der Last 11 erfolgt durch arithmetisches Mitteln der jeweiligen Schätzungen für die Gewichtskraft der Last 11:

$$mg = \frac{\hat{m}_{q1} + \hat{m}_{q2} + \hat{m}_{q3} + \hat{m}_{q4}}{4} g$$

Ferner erfolgt das Ermitteln S7 von Schätzungen von Koordinaten des Schwerpunktes der Last 11 für jede der *n* statischen Posen auf Basis der für die jeweilige statische Pose ermittelten jeweiligen Schätzung der Gewichtskraft der Last 11 und auf Basis der die extern wirkenden Momente angebenden Komponenten des externen Kraftwinders F_{ext}.

Die Schätzungen von Koordinaten werden mit einem Index aus x, y, z für die jeweilige Schätzung angegeben, wobei die Angabe '(4)' die vierte Komponente des vektoriell notierten externen Kraftwinders F_{ext} angibt, die Angabe '(5)' die fünfte Komponente des vektoriell notierten externen Kraftwinders F_{ext} angibt, usw.

$$z_1 = \frac{{}^K\hat{F}_{ext,K,q1}(5)}{\hat{m}_{q1} g}; \; z_2 = \frac{{}^K\hat{F}_{ext,K,q2}(4)}{\hat{m}_{q2} g}; \; z_3 = \frac{-{}^K\hat{F}_{ext,K,q3}(5)}{\hat{m}_{q3} g}; \; z_4 = \frac{-{}^K\hat{F}_{ext,K,q4}(4)}{\hat{m}_{q4} g};$$

$$z_5 = \frac{-{}^K\hat{F}_{ext,K,q5}(4)}{\hat{m}_{q5} g}; \; z_6 = \frac{-{}^K\hat{F}_{ext,K,q6}(5)}{\hat{m}_{q6} g}; \; z_7 = \frac{{}^K\hat{F}_{ext,K,q7}(4)}{\hat{m}_{q7} g}; \; z_8 = \frac{{}^K\hat{F}_{ext,K,q8}(5)}{\hat{m}_{q8} g};$$

$$x_1 = \frac{-{}^K\hat{F}_{ext,K,q2}(6)}{\hat{m}_{q2} g}; \; x_2 = \frac{{}^K\hat{F}_{ext,K,q4}(6)}{\hat{m}_{q4} g}; \; x_3 = \frac{{}^K\hat{F}_{ext,K,q5}(6)}{\hat{m}_{q5} g}; \; x_4 = \frac{-{}^K\hat{F}_{ext,K,q7}(6)}{\hat{m}_{q7} g}$$

$$y_1 = \frac{-{}^K\hat{F}_{ext,K,q1}(6)}{\hat{m}_{q1} g}; \; y_2 = \frac{{}^K\hat{F}_{ext,K,q3}(6)}{\hat{m}_{q3} g}; \; y_3 = \frac{{}^K\hat{F}_{ext,K,q6}(6)}{\hat{m}_{q6} g}; \; y_4 = \frac{-{}^K\hat{F}_{ext,K,q8}(6)}{\hat{m}_{q8} g}$$

Hierbei bezeichnen der tief gestellte Index 'K' den Bezug der jeweiligen Größe vor dem Index auf das Endeffektorkoordinatensystem K, und das hochgestellte 'K' vor der jeweiligen Größe die Notation im Endeffektorkoordinatensystem K. Das Ermitteln S8 des Schwerpunktes der Last 11 mit den Koordinatenx, y, z erfolgt durch arithmetisches Mitteln der jeweiligen Schätzungen für Koordinaten des Schwerpunktes der Last 11:

$$x = \frac{x_1+x_2+x_3+x_4}{4}; \; y = \frac{y_1+y_2+y_3+y_4}{4}; \; z = \frac{z_1+z_2+z_3+z_4+z_5+z_6+z_7+z_8}{8};$$

Hierbei bezeichnen x, y, z die jeweiligen Koordinaten des Schwerpunkts der Last.

Obwohl die Erfindung im Detail durch bevorzugte Ausführungsbeispiele näher illustriert und erläutert wurde, so ist die Erfindung nicht durch die offenbarten Beispiele eingeschränkt und andere Variationen können vom Fachmann hieraus abgeleitet werden, ohne den Schutzumfang der Erfindung zu verlassen. Es ist daher klar, dass eine Vielzahl von Variationsmöglichkeiten existiert. Es ist ebenfalls klar, dass beispielhaft genannte Ausführungsformen wirklich nur Beispiele darstellen, die nicht in irgendeiner Weise als Begrenzung etwa des Schutzbereichs, der Anwendungsmöglichkeiten oder der Konfiguration der Erfindung aufzufassen sind. Vielmehr versetzen die vorhergehende Beschreibung und die Figurenbeschreibung den Fachmann in die Lage, die beispielhaften Ausführungsformen konkret umzusetzen, wobei der Fachmann in Kenntnis des offenbarten Erfindungsgedankens vielfältige Änderungen, beispielsweise hinsichtlich der Funktion oder der Anordnung einzelner, in einer beispielhaften Ausführungsform genannter Elemente, vornehmen kann, ohne den Schutzbereich zu verlassen, der durch die Ansprüche und deren rechtliche Entsprechungen, wie etwa weitergehende Erläuterungen in der Beschreibung, definiert wird.

Bezugszeichenliste

1	Robotermanipulator
3	Basis
5	Glieder
6	Aktuatoren
7	Gelenke
9	Endeffektor
11	Last
13	Drehmomentsensoren
15	Dehnmessstreifen
100	System
101	Steuereinheit
103	Schätzeinheit
105	Recheneinheit
S1	Greifen
S2	Verfahren
S3	Ermitteln
S4	Ermitteln
S5	Ermitteln
S6	Ermitteln
S7	Ermitteln
S8	Ermitteln

Patentansprüche

1. Verfahren zum Ermitteln einer Gewichtskraft und eines Schwerpunktes einer Last (11) für einen Robotermanipulator (1), wobei der Robotermanipulator (1) an einer Basis (3) angeordnet ist und eine Vielzahl von Gliedern (5) aufweist und die Glieder (5) durch Gelenke (7) miteinander verbunden und durch Aktuatoren (6) an den Gelenken (5) gegeneinander verschiebbar oder rotierbar sind, und wobei der Robotermanipulator (1) einen Endeffektor (9) zum Greifen der Last (11) aufweist, aufweisend die Schritte:
- Greifen (S1) der Last (11) mit dem Endeffektor (9),
- Verfahren (S2) der Last (11) in eine Zahl *n* paarweise verschiedene statische Posen,
- Ermitteln (S3) eines jeweiligen externen Kraftwinders F_{ext} für jede der *n* statischen Posen, wobei der jeweilige externe Kraftwinder F_{ext} externe auf den Robotermanipulator (1) wirkende Kräfte und Momente angibt,
- Ermitteln (S4) zumindest der die externen Kräfte angebenden Komponenten des jeweiligen externen Kraftwinders F_{ext} in einem Basiskoordinatensystem, wobei das Basiskoordinatensystem ein kartesisches Koordinatensystem ist und körperfest an der Basis (3) des Robotermanipulators (1) angeordnet ist und eine Achse des Basiskoordinatensystems parallel zu einem Schwerkraftvektor ist,
- Ermitteln (S5) einer jeweiligen Schätzung für die Gewichtskraft der Last (11) aus der jeweiligen in Richtung des Schwerkraftvektors zeigenden Komponente der in dem Basiskoordinatensystem die externen Kräfte angebenden Komponenten des jeweiligen externen Kraftwinders F_{ext},
- Ermitteln (S6) der Gewichtskraft der Last (11) durch Mitteln der jeweiligen Schätzungen für die Gewichtskraft der Last (11),
- Ermitteln (S7) von Schätzungen von Koordinaten des Schwerpunktes der Last (11) für jede der *n* statischen Posen auf Basis der Gewichtskraft der Last (11) oder der für die jeweilige statische Pose ermittelte jeweilige Schätzung der Gewichtskraft der Last (11) und auf Basis der die extern wirkenden Momente angebenden Komponenten des externen Kraftwinders F_{ext}, und
- Ermitteln (S8) des Schwerpunktes der Last (11) durch Mitteln der jeweiligen Schätzungen von Koordinaten des Schwerpunktes.

2. Verfahren nach Anspruch 1,
wobei der externe Kraftwinder F_{ext} durch Drehmomentsensoren (13) in den

Gelenken (7) ermittelt wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1,
wobei der externe Kraftwinder F_{ext} mittels Dehnmessstreifen (15) an den Gelenken (7) oder an den Gliedern (5) ermittelt wird.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
wobei die Last (11) in eine Zahl m der n statischen Posen, mit $m \leq n$, mehrfach aus paarweise verschiedenen Richtungen verfahren wird.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
wobei gilt: $n = 8$.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
wobei das Ermitteln eines jeweiligen externen Kraftwinders F_{ext} für jede der n statischen Posen in einem zum Endeffektor (9) körperfesten Endeffektorkoordinatensystem erfolgt und zum Ermitteln zumindest der die Kräfte angebenden Komponenten des jeweiligen externen Kraftwinders F_{ext} in dem Basiskoordinatensystem eine Systemtransformation zwischen dem Endeffektorkoordinatensystem und dem Basiskoordinatensystem erfolgt.

7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
wobei das Ermitteln von Schätzungen für Koordinaten des Schwerpunktes der Last (11) für jede der n statischen Posen in einem zum Endeffektor (9) körperfesten Endeffektorkoordinatensystem erfolgt.

8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
wobei das Ermitteln des Schwerpunktes der Last (11) durch arithmetisches Mitteln der jeweiligen Schätzungen für Koordinaten des Schwerpunktes der Last (11) erfolgt.

9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
wobei das Ermitteln der Gewichtskraft der Last (11) durch arithmetisches Mitteln der jeweiligen Schätzungen für die Gewichtskraft der Last (11) erfolgt.

10. System (100) zum Ermitteln einer Gewichtskraft und eines Schwerpunktes einer Last (11) für einen Robotermanipulator (1), wobei der Robotermanipulator (1) an

einer Basis (3) angeordnet ist und eine Vielzahl von Gliedern (5) aufweist und die Glieder (5) durch Gelenke (7) miteinander verbunden und durch an den Gelenken (7) angeordnete Aktuatoren (6) gegeneinander rotierbar sind und wobei der Robotermanipulator (1) aufweist:

- einen Endeffektor (9), der zum Greifen der Last (11) ausgeführt ist,
- eine Steuereinheit (101), die dazu ausgeführt ist, die an den Gelenken (7) angeordneten Aktuatoren (6) zum Verfahren der Last (11) in eine Zahl *n* paarweise verschiedene statische Posen anzusteuern,
- eine Schätzeinheit (103), die dazu ausgeführt ist, einen jeweiligen externen Kraftwinder F_{ext} für jede der *n* statische Posen zu ermitteln, wobei der jeweilige externe Kraftwinder F_{ext} externe auf den Robotermanipulator (1) wirkende Kräfte und Momente angibt,
- eine Recheneinheit (105), die dazu ausgeführt ist,

a) zumindest die die Kräfte angebenden Komponenten des jeweiligen externen Kraftwinders F_{ext} in einem Basiskoordinatensystem anzugeben, wobei das Basiskoordinatensystem ein kartesisches Koordinatensystem ist und körperfest an der Basis (3) des Robotermanipulators (1) angeordnet ist und eine Achse des Basiskoordinatensystems parallel zu einem Schwerkraftvektor ist,

b) eine jeweilige Schätzung für die Gewichtskraft der Last (11) aus der jeweiligen in Richtung des Schwerkraftvektors zeigenden Komponente der in dem Basiskoordinatensystem die externen Kräfte angebenden Komponenten des jeweiligen externen Kraftwinders F_{ext} und aus dem Betrag des Schwerkraftvektors zu ermitteln,

c) eine Gewichtskraft der Last (11) durch Mitteln der jeweiligen Schätzungen für die Gewichtskraft der Last (11) zu ermitteln,

d) Schätzungen für Koordinaten des Schwerpunktes der Last (11) für jede der *n* statischen Posen auf Basis der Gewichtskraft der Last (11) oder der für die jeweilige statische Pose ermittelten jeweiligen Schätzung der Gewichtskraft der Last (11) und auf Basis der die extern wirkenden Momente angebenden Komponenten des externen Kraftwinders F_{ext} zu ermitteln, und

e) den Schwerpunkt der Last (11) durch Mitteln der jeweiligen Schätzungen für Koordinaten des Schwerpunktes zu ermitteln.