



(10) DE 10 2019 211 770 B3 2020.09.03

(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2019 211 770.8**  
(22) Anmeldetag: **06.08.2019**  
(43) Offenlegungstag: –  
(45) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: **03.09.2020**

(51) Int Cl.: **B25J 9/18 (2006.01)**  
**B25J 13/08 (2006.01)**  
**B25J 19/06 (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).

(73) Patentinhaber:  
**BIBA - Bremer Institut für Produktion und Logistik GmbH, 28359 Bremen, DE; PUMACY Technologies AG, 06406 Bernburg, DE**

(74) Vertreter:  
**Fink Numrich Patentanwälte PartmbB, 80634 München, DE**

(72) Erfinder:  
**Ghrai, Zied, 28213 Bremen, DE; Heuermann, Aaron, 28219 Bremen, DE; Kirisci, Pierre, 28359 Bremen, DE; Kahlert, Toralf, 14548 Schwielowsee, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

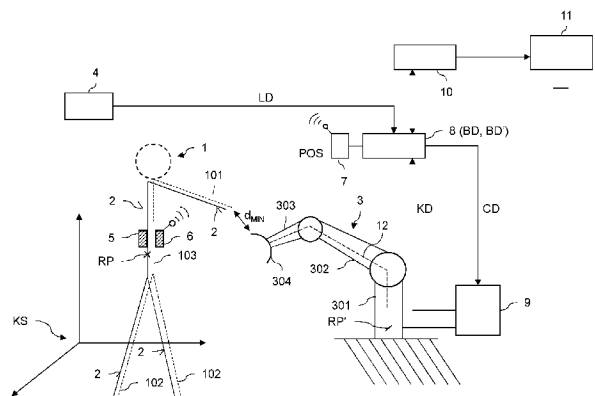
DE	103 20 343	B4
DE	10 2009 046 107	A1
DE	10 2010 017 857	A1
DE	10 2013 110 901	A1
DE	10 2016 112 276	A1
DE	10 2016 200 455	A1
US	2017 / 0 354 353	A1
WO	2015/ 114 089	A1

Norm DIN EN ISO 13849-1 2016-06-00.  
Sicherheit von Maschinen - Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen - Teil 1: Allgemeine Gestaltungsleitsätze (ISO 13849-1:2015);  
Deutsche Fassung EN ISO 13849-1:2015. 113 S.  
URL: [http://perinorm/Perinorm-Volltexte/2016-11\\_Grunbestand/CD21DE\\_06/2300069/2300069.pdf](http://perinorm/Perinorm-Volltexte/2016-11_Grunbestand/CD21DE_06/2300069/2300069.pdf)?  
[abgerufen am 2019-03-28]

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur rechnergestützten Erfassung und Auswertung eines Arbeitsablaufs, bei dem ein menschlicher Werker und ein robotisches System wechselwirken**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur rechnergestützten Erfassung und Auswertung eines Arbeitsablaufs, bei dem ein menschlicher Werker (1) und ein robotisches System (3) wechselwirken. Im Rahmen des erfindungsgemäßen Verfahrens werden basierend auf einer Erfassung mittels einer ersten Sensorik (2, 4, 5) digitale Bewegungsdaten (BD) des Werkers (1) ermittelt. Ferner werden basierend auf einer Erfassung mittels einer zweiten Sensorik (12) und/oder basierend auf kinematischen Steuerdaten (KD) des robotischen Systems (3) digitale Bewegungsdaten (BD') des robotischen Systems (3) ermittelt. Aus den digitalen Bewegungsdaten (BD, BD') des Werkers (1) und des robotischen Systems (3) werden anschließend Bewegungsmuster (BM) ermittelt, welche in den digitalen Bewegungsdaten (BD, BD') enthalten sind, wobei die Extraktion der Bewegungsmuster (BM) auf einer Mustererkennung unter Zugriff auf vorbekannte Bewegungsmuster (BM') basiert. Die ermittelten Bewegungsmuster (BM) werden als Eingabedaten einem datengetriebenen Modell (MO) zugeführt, das über maschinelles Lernen basierend auf Trainingsdaten (TD) gelernt ist, wobei das datengetriebene Modell (MO) als Ausgabedaten Akti-

vitäten (AK) des Werkers (1) und des robotischen Systems (3) bestimmt, wobei eine jeweilige Aktivität (AK) eine oder mehrere Bewegungsmuster (BM) umfasst und einer Arbeitstätigkeit des Werkers (1) oder des robotischen Systems (3) aus einer Mehrzahl von vorgegebenen Arbeitstätigkeiten entspricht.



## Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur rechnergestützten Erfassung und Auswertung eines Arbeitsablaufs, bei dem ein menschlicher Werker und ein robotisches System wechselwirken.

**[0002]** Aus dem Stand der Technik ist es bekannt, im Rahmen eines Arbeitsablaufs, bei dem ein menschlicher Werker und ein robotisches System miteinander interagieren, die Bewegungen des Werkers und des robotischen Systems zu erfassen. Beispielsweise offenbart das Dokument WO 2015/114089 A1 eine Sicherheitseinrichtung für einen Werker, bei dem über eine mobile, vom Werker zu tragende Erfassungseinrichtung der Werker im Arbeitsbereich einer bewegten automatischen Maschine lokalisiert wird, wobei bei einer Kollision oder Kollisionsgefahr mit der automatischen Maschine ein Warnsignal an den Werker übermittelt wird. Bis dato gibt es im Stand der Technik keine Ansätze, die mit entsprechenden Erfassungseinrichtungen erfasste Bewegungen eines Werkers und eines robotischen Systems einer Analyse unterziehen, um rechnergestützt die vom Werker bzw. vom robotischen System ausgeführten Arbeitstätigkeiten zu bestimmen.

**[0003]** Die Druckschrift DE 10 2016 200 455 A1 offenbart eine Sicherheitsvorrichtung und ein Sicherheitsverfahren zum Betrieb eines in einem Arbeitsbereich gesteuert bewegbaren Roboters. Wenn ein Abstand zwischen dem Roboter und einem potenziellen Kollisionsobjekt kleiner als ein berechneter Bremsweg des Roboters ist und wenn ein berechnetes potenzielles Schadensausmaß größer als ein vorgegebener Schadensgrenzwert ist, wird der Roboter stillgesetzt und wenigstens ein im Roboter eingebauter Airbag ausgelöst.

**[0004]** Die Druckschrift DE 10 2016 112 276 A1 beschreibt eine Sicherheitsvorrichtung für eine Mensch-Maschine-Kooperation, bei der Arbeitsbewegungen einer Maschine Wohlbefinden, Gesundheit oder Leben einer Person gefährden können. Die Sicherheitsvorrichtung umfasst einen Sensor zur Überwachung der Person und/oder der Maschine auf Gefahrenereignisse sowie eine mit dem Sensor verbundene Steuerung, die bei Erkennen eines Gefahrenereignisses die Maschine in einen sicheren Zustand überführt. Der Sensor ist ein Körpersignalsensor, der ein Körpersignal der Person erfasst.

**[0005]** Die Druckschrift DE 10 2013 110 901 A1 beschreibt ein Planungsverfahren von Mensch-Roboter-Kollaborationsabläufen. In diesem Verfahren wird ein Layout eines Arbeitsbereichs erfasst, in dem ein Mensch und ein Manipulator innerhalb eines Kollaborationsbereichs zusammenwirken. In dem Layout werden Mensch-Roboter-Kollaborations-

zonen gekennzeichnet. Ferner werden für den Manipulator und/oder eine Manipulatorbestückung Grenzgeometrien erfasst und es wird für mindestens einen Bezugspunkt ein Bewegungsplan erfasst. Mittels eines automatisierten Bewertungsmoduls wird eine zulässige Prozessgeschwindigkeit zur Nachverfolgung des Bewegungsplans ermittelt. Bei der Einhaltung dieser Prozessgeschwindigkeit ist im Falle einer Kollision zwischen Manipulator und Mensch nur mit einer zulässigen Beeinträchtigung des Menschen zu rechnen.

**[0006]** In dem Dokument DE 10 2010 017 857 A1 ist eine 3D-Sicherheitsvorrichtung zur Absicherung und Bedienung mindestens einer Maschine an einem kooperativen Arbeitsplatz offenbart. Die Vorrichtung umfasst einen 3D-Sensor zur Erfassung dreidimensionaler Bilddaten des Arbeitsplatzes, der Maschine und mindestens einer Bedienposition an dem Arbeitsplatz. Ferner ist eine Auswertungseinheit vorgesehen, die dafür ausgebildet ist, Bewegungsmuster der Bedienperson zu bestimmen und bei Erkennung einer Gefährdung der Bedienperson einen Absicherungsbefehl an die Maschine auszugeben. Darüber hinaus ist die Auswertungseinheit dafür ausgebildet, aus den Bewegungsmustern Benutzereingaben an den 3D-Sensor und an die Maschine abzuleiten.

**[0007]** In der Druckschrift DE 10 2009 046 107 A1 ist ein System für eine Interaktion zwischen einer Person und einer Maschine beschrieben. Das System umfasst Markierungsmittel, die an der Person an bestimmten Positionen angeordnet sind, sowie mindestens eine 3D-TOF-Kamera zur dreidimensionalen Erfassung des Interaktionsbereichs und zur Erfassung der Markierungsmittel. Das System beinhaltet ferner eine Auswerteeinheit, die derart ausgestaltet ist, dass ausgehend von den erfassten Markierungsmitteln ein Modell der Person erstellt und eine Position und eine Bewegung der Person erfasst und/oder vorbestimmt wird. Darüber hinaus ist in dem System eine Steuereinheit vorgesehen, welche die Maschine derart ansteuert, dass die Person bei einer sicherheitskritischen Position und/oder Bewegung der Person nicht gefährdet wird.

**[0008]** In der Druckschrift DE 103 20 343 B4 ist ein Verfahren zur überwachten Kooperation zwischen einer Robotereinheit und einem Menschen offenbart, um nach einem vorgegebenen Programmablauf durchzuführende Handhabungsschritte innerhalb eines gemeinsamen Arbeitsraums der Robotereinheit und des Menschen durchzuführen. Die Robotereinheit wird von einer die Handhabungsschritte definierenden Programmablaufsteuerung gesteuert, wobei der Robotereinheit bei relativer Annäherung an den Menschen ein Bewegungsmuster aufgeprägt wird, das sich durch die Bewegungsrichtung, Bewegungsgeschwindigkeit sowie den Abstand der Robotereinheit relativ zum Menschen auszeichnet. In die-

sem Verfahren wird aus einer Vielzahl unterschiedlicher abgespeicherter Bewegungsmuster ein für den Menschen individuelles Bewegungsmuster, das dem Menschen ein Gefühl an Arbeitssicherheit und Kontrolle über die Robotereinheit vermittelt, ausgewählt. Jedes Bewegungsmuster liegt dabei in zumindest einer ersten und zweiten Qualitätsstufe vor. Die Bewegungsmuster der ersten und zweiten Qualitätsstufe unterscheiden sich hinsichtlich der Bewegungsgeschwindigkeit, Bewegungsrichtung und dem Abstand der Robotereinheit relativ zum Menschen.

**[0009]** Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren und eine Vorrichtung zur rechnergestützten Erfassung und Auswertung eines Arbeitsablaufs zu schaffen, bei dem die erfassten Bewegungen eines Werkers und eines robotischen Systems einer umfassenden Analyse zur Extraktion von Arbeitstätigkeiten unterzogen werden.

**[0010]** Diese Aufgabe wird durch das Verfahren gemäß Patentanspruch 1 bzw. die Vorrichtung gemäß Patentanspruch 14 gelöst. Weiterbildungen der Erfindung sind in den abhängigen Ansprüchen definiert.

**[0011]** Im Rahmen des erfindungsgemäßen Verfahrens wird ein Arbeitsablauf, bei dem ein menschlicher Arbeiter und ein robotisches System wechselwirken, erfasst und ausgewertet. Der Begriff des robotischen Systems ist dabei weit zu verstehen und kann je nach Ausgestaltung eine oder mehrere automatisch bewegte Maschinen (d.h. Roboter) umfassen. Gegebenenfalls kann das robotische System auch nur einen einzelnen Roboter enthalten.

**[0012]** Erfindungsgemäß werden basierend auf einer Erfassung mittels einer ersten Sensorik digitale Bewegungsdaten des Werkers ermittelt, welche eine Vielzahl von Positionsdatensätzen für eine Vielzahl von aufeinander folgenden Zeitpunkten enthalten, wobei jeder erste Positionsdatensatz Positionswerte zur Beschreibung der Position und Orientierung von Körperteilen des Werkers in einem ortsfesten Koordinatensystem zum jeweiligen Zeitpunkt enthält. Im Unterschied zu den ersten Positionsdatensätzen beziehen sich die weiter unten genannten zweiten Positionsdatensätze nicht auf die Position und Orientierung von Körperteilen des Werkers, sondern auf die Position und Orientierung von beweglichen Bauteilen des robotischen Systems. Der Begriff der ersten und zweiten Positionsdatensätze ist weit zu verstehen. Es muss lediglich gewährleistet sein, dass sich aus den Positionswerten der Positionsdatensätze die Position und Orientierung von Körperteilen des Werkers bzw. von beweglichen Bauteilen des robotischen Systems im ortsfesten Koordinatensystem ergeben. Vorzugsweise beschreiben die Positionswerte der ersten und zweiten Positionsdatensätze die Position und Orientierung im dreidimensionalen Raum. Unter einem ortsfesten Koordinaten-

system ist ein globales Koordinatensystem zu verstehen, das weder der Bewegung des Werkers noch der Bewegung des robotischen Systems folgt. Vorzugsweise sind das ortsfeste Koordinatensystem und die weiter unten genannten lokalen Koordinatensysteme dreidimensionale Koordinatensysteme.

**[0013]** Im erfindungsgemäßen Verfahrens werden ferner basierend auf einer Erfassung mittels einer zweiten Sensorik und/oder basierend auf kinematischen Steuerdaten des robotischen Systems digitale Bewegungsdaten des robotischen Systems ermittelt, welche eine Vielzahl von zweiten Positionsdatensätzen für eine Vielzahl von aufeinander folgenden Zeitpunkten enthalten, wobei jeder zweite Positionsdatensatz Positionswerte zur Beschreibung der Position und Orientierung von beweglichen Bauteilen des robotischen Systems in dem ortsfesten Koordinatensystem zum jeweiligen Zeitpunkt enthält.

**[0014]** Die oben beschriebenen Bewegungsdaten des Werkers bzw. des robotischen Systems stellen vorverarbeitete Rohdaten dar, die aus der ersten Sensorik bzw. der zweiten Sensorik bzw. der Steuerung des Roboters stammen. Je nach Ausgestaltung kann die Vorverarbeitung neben der eigentlichen Ermittlung der Positionsdatensätze verschiedene Schritte, wie beispielsweise eine Normierung von Sensordaten, eine Umrechnung in standardisierte Einheiten, Transformationen und dergleichen umfassen. Unter kinematischen Steuerdaten des robotischen Systems sind Steuerdaten für das robotische System zu verstehen, die dessen Bewegung bestimmen. Es gibt dabei bekannte Verfahren, die aus solchen Steuerdaten unter Verwendung des CAD- bzw. Kinematik-Modells des robotischen Systems die oben genannten Bewegungsdaten des robotischen Systems ermitteln. Ein solches bekanntes Verfahren wird im Rahmen des erfindungsgemäßen Verfahrens genutzt.

**[0015]** In einem weiteren Schritt des erfindungsgemäßen Verfahrens werden aus den digitalen Bewegungsdaten des Werkers und des robotischen Systems Bewegungsmuster ermittelt, welche in den digitalen Bewegungsdaten enthalten sind und welche erste Bewegungsmuster und zweite Bewegungsmuster umfassen. Die ersten Bewegungsmuster sind jeweils einer Bewegung des Werkers aus einer Vielzahl von vorgegebenen Bewegungen des Werkers zugeordnet. Demgegenüber sind die zweiten Bewegungsmuster jeweils einer Bewegung des robotischen Systems aus einer Vielzahl von vorgegebenen Bewegungen des robotischen Systems zugeordnet. Die Extraktion der Bewegungsmuster erfolgt basierend auf einer Mustererkennung unter Zugriff auf vorbekannte Bewegungsmuster. Diese vorbekannten Bewegungsmuster sind beispielsweise in einer Datenbank gespeichert. Es können dabei beliebige, aus dem Stand der Technik bekannte Verfahren zur Mus-

tererkennung genutzt werden, um die ersten bzw. zweiten Bewegungsmuster zu bestimmen.

**[0016]** Nach der Bestimmung der Bewegungsmuster werden diese als Eingabedaten einem datengetriebenen Modell zugeführt, das über maschinelles Lernen basierend auf Trainingsdaten gelernt ist. Das datengetriebene Modell bestimmt dabei als Ausgabedaten Aktivitäten, die erste und zweite Aktivitäten umfassen. Die ersten Aktivitäten bilden Klassen, die jeweils ein oder mehrere erste Bewegungsmuster als eine Arbeitstätigkeit des Werkers aus einer Mehrzahl von vorgegebenen Arbeitstätigkeiten des Werkers spezifizieren. Mit anderen Worten entspricht eine erste Aktivität einer Arbeitstätigkeit des Werkers. In gleicher Weise bilden die zweiten Aktivitäten Klassen, welche jeweils eine oder mehrere zweite Bewegungsmuster als eine Arbeitstätigkeit des robotischen Systems aus einer Mehrzahl von vorgegebenen Arbeitstätigkeiten des robotischen Systems spezifizieren. Mit anderen Worten entspricht eine zweite Aktivität einer Arbeitstätigkeit des robotischen Systems. Erfindungsgemäß werden somit durch die Verwendung eines datengetriebenen Modells die ursprünglichen Bewegungsmuster entsprechenden Typen bzw. Klassen von Arbeitstätigkeiten zugeordnet. Die Arbeitstätigkeiten stellen folglich eine den Bewegungsmustern übergeordnete Klassifizierung der Bewegungen des Werkers bzw. des robotischen Systems dar.

**[0017]** Je nach Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens können die Bewegungsmuster verschieden definiert werden. Ein Bewegungsmuster kann sich beispielsweise auf die Bewegung eines Fingers des Werkers, das Anheben eines Arms des Werkers, das Vorbeugen des Werkers, eine bestimmte Roboterbewegung und dergleichen beziehen. Im Gegensatz dazu werden durch die Aktivitäten bestimmte Bewegungsmuster zu Arbeitstätigkeiten abstrahiert. Dabei können unterschiedliche Bewegungsmuster ggf. auch zu gleichen Aktivitäten führen. Eine Aktivität kann beispielsweise einen vorbestimmten Montageschritt, einen vorbestimmten Transportschritt oder einen beliebigen anderen Arbeitsschritt festlegen.

**[0018]** In einer bevorzugten Variante des erfindungsgemäßen Verfahrens werden im Rahmen der Ermittlung der Bewegungsmuster zunächst aus den digitalen Bewegungsdaten des Werkers und des robotischen Systems Segmente extrahiert, welche erste Segmente und zweite Segmente umfassen. Die ersten Segmente umfassen jeweils erste Positionsdatensätze für mehrere aufeinander folgende Zeitpunkte und die zweiten Segmente umfassen jeweils zweite Positionsdatensätze für mehrere aufeinander folgende Zeitpunkte. Nach der Extraktion der Segmente werden aus diesen die Bewegungsmuster extrahiert, wobei die ersten Bewegungsmuster jeweils

ein oder mehrere erste zeitlich aufeinander folgende Segmente umfassen und die zweiten Bewegungsmuster jeweils ein oder mehrere zweite zeitlich aufeinander folgende Segmente umfassen.

**[0019]** Je nach Ausgestaltung können die Segmente auf verschiedene Art und Weise bestimmt werden. In einer einfachen Variante sind die Segmente aufeinander folgende erste bzw. zweite Positionsdatensätze in einem Zeitfenster fester Länge. Gegebenenfalls kann bei der Segmentierung eine Assoziationsanalyse der Bewegungsdaten vorgenommen werden. Die Implementierung einer solchen Assoziationsanalyse liegt im Rahmen von fachmännischem Handeln. Durch eine Vorverarbeitung mittels einer Segmentierung kann die nachfolgende Mustererkennung einfach und effizient implementiert werden.

**[0020]** In einer weiteren bevorzugten Ausgestaltung werden die Aktivitäten einem Process-Mining unterzogen, wodurch Informationen zu einem oder mehreren Arbeitsprozessen gewonnen werden, die durch die Aktivitäten repräsentiert werden und im Arbeitsablauf enthalten sind. Somit werden erstmals Methoden des Process-Mining im Bereich der Kollaboration eines Werkers mit einem robotischen System eingesetzt. Process-Mining-Methoden sind an sich aus dem Stand der Technik bekannt und deren Implementierung im Bereich der Mensch-Roboter-Kollaboration liegt im Rahmen von fachmännischem Handeln. Neben der Identifikation von Arbeitsprozessen (Process Discovery) können über Process-Mining die identifizierten Arbeitsprozesse ggf. auch einem Prozessvergleich unterzogen werden bzw. Optimierungsmöglichkeiten für die identifizierten Prozesse ermittelt werden.

**[0021]** In einer weiteren bevorzugten Ausführungsform wird basierend auf den Aktivitäten eine Ausgabe über eine Benutzerschnittstelle zur Assistenz des Werkers generiert. Zum Beispiel kann der Werker über die Benutzerschnittstelle eine qualitative Rückmeldung erhalten, ob eine Arbeitstätigkeit korrekt ausgeführt wurde.

**[0022]** Das datengetriebene Modell, das im erfindungsgemäßen Verfahren zur Klassifikation der Bewegungsmuster in Aktivitäten verwendet wird, kann beliebig ausgestaltet sein. Vorzugsweise basiert das datengetriebene Modell auf einem oder mehreren neuronalen Netzen, z.B. einem oder mehreren mehrschichtigen und/oder rekurrenten neuronalen Netzen, bzw. einem oder mehreren Bayesschen Netzen bzw. auf Support Vector Machines bzw. auf Entscheidungsbäumen. All diese datengetriebenen Modelle sind an sich bekannt und können mit geeigneten maschinellen Lernverfahren basierend auf Trainingsdaten gelernt werden. Je nach Ausgestaltung kann das gelernte datengetriebene Modell mittels überwachten Lernens oder mittels unüberwachten Lernens ge-

lernt worden sein. Die Trainingsdaten sind in diesem Fall derart ausgestaltet, dass sie für eine Vielzahl von Gruppen aus einem oder mehreren Bewegungsmustern die der jeweiligen Gruppe zugeordnete Aktivität angeben.

**[0023]** In einer bevorzugten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens umfasst die erste Sensorik eine Vielzahl von körpernahen Sensoren, die unmittelbar oder mittelbar (z.B. integriert in Bekleidung) am Körper des Werkers angebracht sind, vorzugsweise mehrere Faser-Bragg-Gitter-Sensoren und/oder einen oder mehrere Lage- bzw. Orientierungs-Sensoren und/oder einen oder mehrere Beschleunigungs-Sensoren und/oder einen oder mehrere Inertialsensoren. Diese Sensoren sind aus dem Stand der Technik bekannt. Beispielsweise werden Faser-Bragg-Gitter-Sensoren, die am Körper eines Menschen angebracht sind, in dem Dokument US 2017/0354353 A1 beschrieben. Analog zu der ersten Sensorik kann auch die zweite Sensorik (falls vorhanden) derart ausgestaltet sein, dass sie eine Vielzahl von roboternahen Sensoren umfasst, die an einem oder mehreren beweglichen Bauteilen der robotischen Einrichtung angebracht sind. Auch diese Sensoren können als Faser-Bragg-Gitter-Sensoren bzw. Lage-Sensoren bzw. Beschleunigungs-Sensoren bzw. Inertialsensoren ausgestaltet sein.

**[0024]** In einer bevorzugten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens werden über die Erfassung mittels der ersten Sensorik für ein jeweiliges Körperteil lokale Positionswerte in einem lokalen Koordinatensystem ermittelt, das dem jeweiligen Körperteil zugeordnet ist. Die Positionswerte der ersten Positionsdatensätze hängen dabei von den lokalen Positionswerten und einem Positionswert eines Referenzpunkts des Werkers im ortsfesten Koordinatensystem ab. Der Referenzpunkt des Werkers weist eine feste Positionsbeziehung zu den lokalen Koordinatensystemen auf. Alternativ oder zusätzlich werden über die Erfassung mittels der zweiten Sensorik und/oder aus den kinematischen Steuerdaten für ein jeweiliges bewegliches Bauteil des robotischen Systems lokale Positionswerte in einem lokalen Koordinatensystem ermittelt, das dem jeweiligen beweglichen Bauteil zugeordnet ist, wobei die Positionswerte der zweiten Positionsdatensätze von den lokalen Positionswerten und einem Positionswert eines Referenzpunkts des robotischen Systems im ortsfesten Koordinatensystem abhängen.

**[0025]** Der Referenzpunkt des robotischen Systems weist eine feste Positionsbeziehung zu den lokalen Koordinatensystemen auf.

**[0026]** Je nach Ausgestaltung der soeben beschriebenen Variante kann der Referenzpunkt des Werkers bzw. des robotischen Systems ein fester oder beweglicher Referenzpunkt sein. Im Falle eines be-

weglichen Referenzpunkts umfasst die erste Sensorik vorzugsweise eine Lokalisationssensorik, mit welcher der (aktuelle) Positionswert des Referenzpunkts des Werkers im ortsfesten Koordinatensystem mit Hilfe einer Ortung basierend auf drahtlos übertragenen Signalen erfasst wird. Alternativ oder zusätzlich kann auch die zweite Sensorik eine Lokalisationssensorik umfassen, mit welcher der (aktuelle) Positionswert des Referenzpunkts des robotischen Systems im ortsfesten Koordinatensystem mit Hilfe einer Ortung basierend auf drahtlos übertragenen Signalen erfasst wird.

**[0027]** Für die oben beschriebene Ortung basierend auf drahtlosen Signalen können an sich bekannte Technologien genutzt werden, die z.B. auf Laufzeitmessungen bzw. Feldstärkemessungen beruhen. Beispielsweise kann die Lokalisationssensorik der ersten Sensorik und/oder die Lokalisationssensorik der zweiten Sensorik auf einer Ortung mittels Ultraschallsignalen und/oder mittels elektromagnetischer Hochfrequenzsignalen, vorzugsweise über Bluetooth und/oder UWB (UWB = Ultra-Wideband), basieren. Alternativ kann auch jedes andere Kurzstreckenfunkbasierte System als Lokalisationssensorik verwendet werden. Ebenso kann eine Lokalisation mittels eines oder mehrerer Laserscanner durchgeführt werden.

**[0028]** In einer weiteren bevorzugten Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens ist zumindest ein Teil der ersten Sensorik und vorzugsweise die gesamte erste Sensorik redundant ausgelegt, so dass durch die erste Sensorik ein oder mehrere Sätze von redundanten Messwerten erhalten werden, wobei die redundanten Messwerte eines jeweiligen Satzes unabhängig voneinander erfasst wurden und im Falle, dass die redundanten Messwerte eines jeweiligen Satzes um ein vorbestimmtes Maß voneinander abweichen, eine oder mehrere vorgegebene Aktionen automatisch ausgeführt werden.

**[0029]** Alternativ oder zusätzlich kann auch zumindest ein Teil der zweiten Sensorik und vorzugsweise die gesamte zweite Sensorik redundant ausgelegt sein, so dass durch die zweite Sensorik ein oder mehrere Sätze von redundanten Messwerten erhalten werden, wobei die redundanten Messwerte eines jeweiligen Satzes unabhängig voneinander erfasst wurden und im Falle, dass die redundanten Messwerte eines jeweiligen Satzes um ein vorbestimmtes Maß voneinander abweichen, eine oder mehrere vorgegebenen Aktionen automatisch ausgeführt werden. Ein solches redundant ausgelegtes System ermöglicht eine funktional sichere Mensch-Roboter-Kollaboration.

**[0030]** Die oben beschriebenen Messwerte der ersten bzw. zweiten Sensorik können unmittelbar die erfassten Messrohdaten bzw. auch im Rahmen des Verfahrens vorverarbeitete Messwerte betreffen. Je

nach Ausgestaltung können die vorgegebene Aktion bzw. vorgegebenen Aktionen unterschiedlich festgelegt werden. In einer Variante umfassen die vorgegebenen Aktionen eine Ausgabe über eine Benutzerschnittstelle, um hierdurch einen Benutzer darauf hinzuweisen, dass Messfehler vorliegen. Ebenso kann eine vorgegebene Aktion darin bestehen, dass das robotische System zur Vermeidung von Kollisionen angehalten wird.

**[0031]** In einer weiteren Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens wird überwacht, ob in regelmäßigen Zeitabständen Messwerte der ersten Sensorik und/oder der zweiten Sensorik über eine Datenübertragungsstrecke, die drahtgebunden oder drahtlos sein kann, übermittelt werden. Im Falle, dass die regelmäßigen Zeitabstände nicht eingehalten werden, werden eine oder mehrere vorgegebene Aktionen automatisch ausgeführt. Die Aktionen können beliebig ausgestaltet sein und insbesondere wiederum ein Anhalten des robotischen Systems bzw. die Ausgabe einer Warnmeldung über eine Benutzerschnittstelle umfassen. Der Fall, dass die regelmäßigen Zeitabstände nicht eingehalten werden, kann beispielsweise über einen vorgegebenen Schwellwert definiert sein, wobei dann, wenn ein Zeitabstand mehr als der vorgegebener Schwellwert von einem vorgegebenen regelmäßigen Zeitabstand abweicht, die vorgegebene Aktion bzw. die vorgegebenen Aktionen automatisch ausgeführt werden.

**[0032]** In einer weiteren Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens wird aus den digitalen Bewegungsdaten des Werkers und den digitalen Bewegungsdaten des robotischen Systems der minimale Abstand zwischen Werker und robotischem System berechnet und das robotische System wird in Abhängigkeit von diesem berechneten minimalen Abstand gesteuert. Vorzugsweise wird dabei die Geschwindigkeit des robotischen Systems umso kleiner, je geringer der minimale Abstand ist. Ebenso ist es möglich, dass das robotische System angehalten wird, wenn der minimale Abstand eine vorgegebene Schwelle unterschreitet. Auf diese Weise können Kollisionen des Werkers mit dem robotischen System verhindert werden.

**[0033]** In einer Variante der soeben beschriebenen Ausführungsform wird basierend auf der Erfassung mittels der zweiten Sensorik und/oder aus den kinematischen Steuerdaten des robotischen Systems und/oder basierend auf einer Erfassung mittels einer weiteren Sensorik ferner abgeleitet, ob zum jeweiligen Zeitpunkt ein oder mehrere Werkstücke mit vorbestimmten Abmessungen durch das robotische System gehalten werden, wobei die vorbestimmten Abmessungen von gehaltenen Werkstücken bei der Berechnung des minimalen Abstands dadurch berücksichtigt werden, dass das oder die gehaltenen Werkstücke als Teil des robotischen Systems behan-

delt werden. Hierdurch kann das Risiko von Kollisionen weiter vermindert werden. Um abzuleiten, ob ein oder mehrere Werkstücke mit vorbestimmten Abmessungen durch das robotische System gehalten werden, kann die weitere Sensorik z.B. Kraftmessdosens/6-Achs-Kraftmomentensensoren umfassen, um anhand des Gewichts sowie der Schwerpunkte und Trägheitsmomente zu erkennen, welches Werkstück aufgenommen wurde, und dann das richtige CAD-Modell des entsprechenden Werkstücks zur Distanzberechnung hinzuzuziehen.

**[0034]** Neben dem oben beschriebenen Verfahren betrifft die Erfindung eine Vorrichtung zur rechnergestützten Erfassung und Auswertung eines Arbeitsablaufs, bei dem ein menschlicher Werker und ein robotisches System wechselwirken, wobei die Vorrichtung eine Rechneinrichtung zur rechnergestützten Ausführung des erfindungsgemäßen Verfahrens bzw. einer oder mehrerer bevorzugter Varianten des erfindungsgemäßen Verfahrens umfasst. Die Rechneinrichtung kann dabei ggf. auf mehrere unterschiedliche Rechneinheiten verteilt sein. Ferner ist die erste Sensorik und auch die zweite Sensorik (sofern vorhanden) Bestandteil der Rechneinrichtung. Darüber hinaus enthält die Rechneinrichtung ein Mittel zum Empfang von kinematischen Steuerdaten aus der Steuerung des robotischen Systems, sofern kinematische Steuerdaten bei der Ermittlung der digitalen Bewegungsdaten des robotischen Systems verarbeitet werden.

**[0035]** Ein Ausführungsbeispiel der Erfindung wird nachfolgend anhand der beigegeführten Figuren detailliert beschrieben.

**[0036]** Es zeigen:

**Fig. 1** eine schematische Darstellung eines Systems, mit dem eine Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens durchgeführt wird;

**Fig. 2** eine Detailansicht der körpernahen Sensorik aus **Fig. 1**;

**Fig. 3** eine Detailansicht des Lokalisationssystems aus **Fig. 1**; und

**Fig. 4** ein Flussdiagramm, das den Ablauf der Verarbeitung der Bewegungsdaten des Werkers und des Roboters aus **Fig. 1** verdeutlicht.

**[0037]** Das im Folgenden beschriebene System der **Fig. 1** dient dazu, die Bewegungen eines menschlichen Werkers **1** sowie einer robotischen Einrichtung in der Form eines Roboters **3** zu erfassen, wobei der Werker und der Roboter miteinander wechselwirken. Basierend auf den erfassten Bewegungen wird der Roboter **3** mittels einer Robotersteuerung **9** geeignet gesteuert. Ferner werden rechnergestützt aus den Bewegungen des Werkers und des Roboters Aktivitäten und hieraus mittels Process-Mining Arbeitspro-

zesse abgeleitet. Diese Informationen können den Werker **1** bei der Ausführung seiner Tätigkeiten unterstützen.

**[0038]** Der Werker **1** ist in **Fig. 1** schematisch durch gestrichelte Linien dargestellt. Ein Arm des Werkers ist mit Bezugszeichen **101** bezeichnet und die beiden Beine des Werkers sind jeweils mit Bezugszeichen **102** bezeichnet. Ferner ist der Rumpf bzw. Rücken des Werkers mit Bezugszeichen **103** bezeichnet. Die Aufgabe der Lokalisierung des Werkers und dessen Körperteile **101** bis **103** wird zum einen mittels einer körpernen Sensorik in der Form von Faser-Bragg-Gitter-Sensoren **2** und zum anderen über ein Lokalisationssystem erreicht, das ein Basisstationssystem **4** sowie eine Transpondereinrichtung **5** umfasst, die näher aus **Fig. 3** ersichtlich sind. Die Transpondereinrichtung **5** wird von Werker **1** getragen.

**[0039]** Zunächst wird im Folgenden die körpernahe Sensorik basierend auf den Faser-Bragg-Gitter-Sensoren **2** beschrieben. Die Funktionsweise dieser Sensorik ist an sich bekannt. **Fig. 2** zeigt im größeren Detail den Aufbau der Sensorik. In dieser Figur ist der Werker wiederum mit Bezugszeichen **1** sowie seine Arme mit Bezugszeichen **101**, seine Beine mit Bezugszeichen **102** und sein Rücken bzw. Rumpf mit Bezugszeichen **103** bezeichnet. Entlang dieser Körperteile erstreckt sich ein jeweiliger Faser-Bragg-Gitter-Sensor **2**, der in an sich bekannter Weise jeweilige optische Fasern **201** sowie einen Interrogator **202** umfasst, das an einem Ende der jeweiligen Fasern vorgesehen ist und zum einen Licht mit einem vorgegebenen Frequenzspektrum mittels einer Lichtquelle in die entsprechende Faser sendet und zum anderen das Frequenzspektrum des durch die Faser reflektierten Lichts mittels eines faseroptischen Spektrometers erfasst. Die Fasern können punktuell beispielsweise mit Klettbindern fixiert werden oder fest in die Arbeitskleidung des Werkers (Weste, Jacke, Hose, Overall, Handschuhe) integriert werden. Gegebenenfalls können auch mehrere Fasern pro Körperteil vorgesehen sein.

**[0040]** Die einzelnen optischen Fasern **2** umfassen in der hier beschriebenen Ausführungsform jeweils Einzelkernfasern, in denen in einem einzelnen Faserkern mehrere Faser-Bragg-Gitter (z.B. FGB-Triplets) leicht versetzt oder parallel auf derselben Höhe im Faserkern eingebracht sind, um hierdurch mehrdimensionale Verbiegungen zu messen. Ein Faser-Bragg-Gitter zeichnet sich durch eine lokale periodische Variation der Brechzahl im entsprechenden Faserkern aus. Die Faser-Bragg-Gitter sind dabei an entsprechenden Knick- bzw. Biegestellen entlang der Körperteile, wie Schultergelenk, Ellenbogen, Handgelenk, Wirbelsäule, Hüfte und Knie, vorgesehen. Bei entsprechender Knick- bzw. Biegebewegung verändert sich das mit dem faseroptischen Spektrometer des Interrogators **202** erfasste Reflexionsspektrum.

Durch die Verwendung mehrerer Faser-Bragg-Gitter an den jeweiligen Knick- bzw. Biegestellen können hierüber dreidimensionale Biegungen und torosiale Belastungen und Bewegung der Körperteile des Menschen in Echtzeit ermittelt werden. Anstatt der Verwendung einer Einzelkernfaser ist es ggf. auch möglich, eine Mehrkernfaser zu nutzen, in der die Faser-Bragg-Gitter separat in unterschiedlichen Faserkernen eingebracht sind.

**[0041]** Jeder faseroptische Interrogator **202** stellt eine Auswerteeinheit dar, die regelmäßig (alle paar Millisekunden) Daten über die 3D-Verformungen der Fasern zur Verfügung stellt. Diese Auswerteeinheit (auch mobiles faseroptisches Messgerät genannt) ist somit im Wesentlichen ein miniaturisiertes Spektrometer, das mit der Sensorfaser verbunden ist. Mit dem Spektrometer werden sowohl Emissionsspektren als auch Absorptionsspektren und Aussagen zur frequenzabhängigen Reflexion gewonnen. Diese werden anhand einer Software zur Formrekonstruktion (shape reconstruction) in ein 3D-Computermodell überführt. Hierfür werden zunächst anhand der bekannten Positionen der Faser-Bragg-Gitter bzw. FBG-Triplets innerhalb der Fasern sowie der (relativen) Amplituden der durch ein Faser-Bragg-Gitter jeweils adressierten Spektralbereiche die Biegeradien und Richtungen für die einzelnen Messpositionen (d.h. Positionen der Faser-Bragg-Gitter) berechnet. Mittels Positionen, Biegeradien und Richtungen können anschließend (und mit Interpolation) die kartesischen Koordinaten für jeden Messpunkt berechnet werden. Diese Daten ermöglichen ein Echtzeit-nahes digitales 3D-Abbild der Sensorfasern. Da die Sensorfasern am Körper oder der Arbeitskleidung des Werkers fixiert sind, entspricht das 3D-Abbild der Sensorfaser der Bewegung/Haltung der entsprechenden Gliedmaße. Somit kann anhand der Daten ein abstrahiertes digitales 3D-Modell der Gliedmaße erzeugt werden. Folglich ist die Aufgabe der faseroptischen Sensoren die Bestimmung der Orientierung und Position der Sensorfaser in Echtzeit relativ zu deren Ursprung.

**[0042]** Die 3D-Positionsdaten einer jeweiligen Sensorfaser beziehen sich auf ein lokales Koordinatensystem LK, das jeweils am Ursprung der Faser am Ort des Spektrometers liegt. In **Fig. 2** sind beispielhaft zwei solcher lokaler Koordinatensysteme für die Faser-Bragg-Gitter-Sensoren der Beine **102** angedeutet. Die lokalen Koordinatensysteme LK haben ferner eine feste Positionsbeziehung zu einem Referenzpunkt **RP** des Werkers, an dem sich das Koordinatensystem **WK** des Werkers befindet. Die Daten über die 3D-Verformungen der Sensorfasern beziehen sich immer auf das entsprechende lokale Koordinatensystem. Indem die Ursprünge der Sensorfasern zueinander in Beziehung gesetzt werden, lassen sich die lokalen Koordinatensysteme in das (gemeinsame) Koordinatensystem **WK** des Werkers einordnen.

Hierfür müssen die Distanzen zwischen verschiedenen Ursprüngen und Endpunkten der Sensorfasern festgelegt werden. Durch die Einordnung der lokalen Koordinatensysteme in das gemeinsame Koordinatensystem lassen sich die digitalen 3D-Modelle der Körperteile zu einem digitalen 3D-Modell des Menschen zusammensetzen. Das digitale 3D-Modell des Menschen ermöglicht jederzeit eine Aussage über die Bewegung bzw. aktuelle Körperhaltung des Werkers. Für die Erhöhung der Zuverlässigkeit können dabei die Fasern des faseroptischen Sensorsystem bzw. der körpernahen Sensorik in allen Körperteilen redundant vorgesehen sein.

**[0043]** Die 3D-Informationen der Spektrometer jedes Faser-Bragg-Gitter-Sensors werden in einer körpernahen Rechen- und Kommunikationseinheit zusammengeführt, die in **Fig. 1** mit Bezugszeichen **6** bezeichnet ist und vom Werker getragen wird. Diese Rechen- und Kommunikationseinheit besteht im Wesentlichen aus einem sicheren Mikrocontroller, wie weiter unten näher beschrieben ist. Die Informationen der Spektrometer werden dabei kabelgebunden bzw. ggf. auch kabellos an die Rechen- und Kommunikationseinheit übermittelt, welche über eine Schnittstelleneinheit (z.B. eine Zusatzplatine des sicheren Mikrocontrollers) verfügt.

**[0044]** Ergänzend zu den Faser-Bragg-Gitter-Sensoren können ggf. auch an weiteren ausgewählten Punkten am Körper oder in der Kleidung des Werkers weitere Sensoren vorgesehen sein, wie Orientierungs-, Beschleunigungs- oder Inertialsensoren. Die Daten dieser Sensoren können ebenfalls in der oben erwähnten Schnittstelleneinheit zusammengeführt werden. Inertialsensoren sind eine Kombination aus Beschleunigungssensor, Gyroskop und Magnetometer. Durch die Nutzung verschiedener Sensortypen und Sensordaten können Fehler durch Messtoleranzen korrigiert und herausgerechnet werden, so dass die Genauigkeit und Zuverlässigkeit sowie Funktionssicherheit gesteigert werden kann. Beispielsweise kann der Biegungswinkel eines Arms mit einem Faser-Bragg-Gitter-Sensor erfasst werden und zusätzlich die Orientierung des Arms über einen am Handgelenk befestigten Orientierungssensor gemessen werden. Beide Sensoren sollten übereinstimmende Messwerte liefern. Durch die Berücksichtigung beider Messwerte kann die gemessene Armhaltung bestätigt bzw. ggf. korrigiert werden.

**[0045]** Die Rechen- und Kommunikationseinheit besteht im Wesentlichen aus einem sicheren Mikrocontroller, der über redundante Prozessoren verfügt und einen automatischen Vergleich der Berechnungen der Prozessoren durchführt. Der funktional sichere Mikrocontroller wird für die sichere Sensordatenverarbeitung eingesetzt. Hierbei können sich funktional sichere Mikrocontroller an einer diskreten oder Multicore-Architektur orientieren. Bei einer dis-

kreten Architektur sind zwei diskrete Mikrocontroller miteinander verbunden, wobei ein Mikrocontroller einen Steueralgorithmus ausführt, während der andere einen Überwachungsalgorithmus ausführt. Der Überwachungsalgorithmus bestätigt hierbei die Plausibilität des Steuerungsalgorithmus. Ein funktional sicherer Mikrocontroller wird immer dann verwendet, wenn im Rahmen von Robotikanwendungen nach der Norm ISO 13849 ein hohes Performance-Level (mindestens Performance-Level D Kategorie **3** bzw. SIL2) und eine Ausfallsicherheit gewährleistet werden muss.

**[0046]** Das körpernahe Sensorsystem aus den oben beschriebenen Faser-Bragg-Gitter-Sensoren und ggf. den zusätzlichen Orientierungs- bzw. Beschleunigungs- bzw. Inertialsensoren orientiert sich vorzugsweise ebenfalls an der funktionalen Sicherheit in Robotikanwendungen gemäß der Norm ISO 13849. Dies wird bei der Bewegungserfassung (Orientierung) durch eine redundante Messung erreicht, d.h. an jeder Messposition werden mindestens zwei Messpunkte angebracht. Vorzugsweise verlaufen zwei faseroptische Stränge parallel nebeneinander und werden durch separate Spektrometer ausgewertet. Die Resultate der Messungen werden dann von dem oben beschriebenen sicheren Mikrocontroller (diskrete oder Multicore-Architektur, Kategorie **3** nach ISO 13849) verglichen. Dabei muss jedoch sichergestellt werden, dass sich die redundanten Kanäle nicht gegenseitig beeinflussen können. Beide Kanäle werden hier kontinuierlich und gleichzeitig überwacht. Bei einer Abweichung der Messergebnisse der beiden Kanäle wird durch den Mikrocontroller ein Fehler festgestellt, der dann an den weiter unten beschriebenen Rechner **8** übermittelt wird, der wiederum veranlasst, dass ein sicherer Halt des Roboters **3** mittels der Robotersteuerung **9** durchgeführt wird.

**[0047]** Die körpernahe Rechen- und Kommunikationseinheit **6** wird mittels Akkumulatoren mit Energie versorgt. Die Einheit besitzt neben einer kabelgebundenen Schnittstelle, wie z.B. USB und LAN, eine drahtlose Schnittstelle zur Kommunikation der aufgenommenen Sensordaten der körpernahen Sensorik an eine externe Empfangseinheit **7**. In **Fig. 1** sind die an die Empfangseinheit **7** übertragenen Daten mit POS bezeichnet. Diese Daten stellen Positionsdaten der Sensorfasern der Faser-Bragg-Gitter-Sensoren in den jeweiligen lokalen Koordinatensystemen LK dar. Die Positionsdaten POS werden in regelmäßigen Zeitabständen (beispielsweise alle 25 ms) für aktualisierte Körperhaltungen an die Empfangseinheit **7** übermittelt. Die Empfangseinheit übernimmt dabei auch eine sog. Watchdog-Funktion. Gemäß dieser Funktion nimmt die Empfangseinheit die eintreffenden Datenpakete entgegen und erwartet ein Set bzw. eine Gruppe von Datensätzen in einer vorbestimmten Frequenz von der körpernahen Sensorik. Trifft in

der erwarteten Zeit kein Set von Datensätzen ein, wurden Datensätze entweder nicht versendet oder sie sind auf der drahtlosen Übertragungsstrecke zwischen Rechen- und Kommunikationseinheit **6** und Empfangseinheit **7** verloren gegangen. Basierend auf der Watchdog-Funktion der Empfangseinheit **7** wird in einem solchen Fall ein Fehler ausgelöst, der den weiter unten beschriebenen Rechner **8** dazu veranlasst, den Roboter **3** anzuhalten.

**[0048]** Die Empfangseinheit **7** sowie die körpernahe Rechen- und Kommunikationseinheit **6** können beispielsweise als PROFINET/EtherCat-fähige Komponenten ausgestaltet sein und gegebenenfalls das Protokoll PROFI-safe/Safety-over-EtherCAT verwenden. Dabei kann die Empfangseinheit **7** mittels eines Ethernet-Kabels mit dem Rechner **8** verbunden sein. Der Rechner ist in diesem Fall ein Industrie-PC bzw. eine Software- oder Hardware-SPS (SPS = Speicherprogrammierbare Steuerung).

**[0049]** Um die lokalen Positionsdaten POS in Beziehung zu dem ortsfesten Koordinatensystem KS zu setzen, muss ferner die Bewegung des Werkers **1**, d.h. von dessen Referenzposition RP, erfasst werden. Hierzu wird in der Ausführungsform der **Fig. 1** ein Lokalisationssystem verwendet, das ein Basisstationssystem **4** und eine Transpondereinrichtung **5** umfasst und im Detail in **Fig. 3** gezeigt ist. In der dort dargestellten Ausführungsform werden zur Lokalisation zwei unterschiedliche Technologien genutzt, um redundant die Referenzposition **RP** des Werkers **1** zu bestimmen.

**[0050]** Das Lokalisationssystem der **Fig. 3** enthält ein erstes und ein zweites Lokalisationssystem. Das erste Lokalisationssystem sendet drahtlos Signale über vier Basisstationen **401** aus, wobei die Signale drahtlos von einem Paar von Transpondern **501** der Transpondereinrichtung **5** empfangen werden. Als Mindestvoraussetzung enthält das erste Lokalisationssystem drei Basisstationen und einen Transponder, wobei vorzugsweise eine größere Anzahl an Basisstationen und Transponder vorgesehen ist. Bei Empfang entsprechender Signale sendet jeder Transponder **501** ein Antwortsignal aus, das von den Basisstationen **401** wieder empfangen wird. Über eine Laufzeitmessung der jeweiligen Signale in den einzelnen Basisstationen **401** kann dann der Abstand zu den jeweiligen Transpondern **501** bestimmt werden und über Triangulation die Position der Transponder in Bezug auf das ortsfeste Koordinatensystem KS (siehe **Fig. 1**) bestimmt werden. Die beiden Transponder **501** stehen dabei in einer festen Positionsbeziehung zur Referenzposition RP, so dass die Referenzposition separat für jeden Transponder ermittelt werden kann. Die endgültige Referenzposition kann beispielsweise durch Mittelwertbildung der Referenzpositionen aller Transponder **501** erhalten werden, sofern die beiden Referenzpositionen nicht

zu stark voneinander abweichen. Wird eine zu große Abweichung festgestellt, kann ein Fehler bei der Lokalisation festgestellt werden und der entsprechende Wert der Referenzposition verworfen werden. Durch die Verwendung von zwei oder ggf. mehr Transpondern für das entsprechende Lokalisationssystem kann die Zuverlässigkeit der Lokalisationsergebnisse verbessert werden und die entsprechende Referenzposition des Menschen bestätigt oder korrigiert werden.

**[0051]** Das erste Lokalisationssystem basierend auf den Basisstationen **401** und den Transpondern **501** ist ein sog. Ultrasonic-Beacon-basiertes Lokalisationssystem, bei dem als drahtlose Signale Ultraschallpulse durch die Basisstationen **401** und die Transponder **501** ausgesendet und empfangen werden. Nichtsdestotrotz kann auch eine andere Technologie für dieses Lokalisationssystem genutzt werden, z.B. basierend auf Bluetooth. In diesem Fall sind die drahtlosen Signale Hochfrequenz-Signale im Bluetooth-Frequenzbereich.

**[0052]** Neben dem ersten Lokalisationssystem basierend auf Basisstationen **401** und Transpondern **501** enthält das Lokalisationssystem der **Fig. 3** ein zweites Lokalisationssystem, das analog zu dem ersten Lokalisationssystem vier Basisstationen **402** sowie ein entsprechendes Paar von Transpondern **502** umfasst. Die Transponder sind wiederum am menschlichen Werker **1** angebracht und Teil der Transpondereinrichtung **5**. Als Mindestvoraussetzung enthält das zweite Lokalisationssystem drei Basisstationen und einen Transponder, wobei vorzugsweise eine größere Anzahl an Basisstationen und Transponder vorgesehen ist.

**[0053]** Das zweite Lokalisationssystem verwendet eine andere Technologie zur Lokalisation. Im hier beschriebenen Ausführungsbeispiel wird ein UWB-basiertes Lokalisationssystem genutzt, bei dem auf Basis der Ultrabreitband-Übertragungstechnik Signale durch die Basisstationen bzw. UWB-Anker **402** und die Transponder **502** ausgesendet bzw. empfangen werden. Der Vorgang der Lokalisation dieses zweiten Lokalisationssystems entspricht dem oben beschriebenen ersten Lokalisationssystem. Das heißt, die Lokalisation erfolgt über eine entsprechende Laufzeitmessung der Signale von jeweiligen Basisstationen zum Transponder und vom Transponder zurück zu den Basisstationen mit einer darauf basierenden Triangulation. Alternativ kann die Lokalisation auch über eine Messung der Eingangswinkel der Signale an den Basisstationen erfolgen.

**[0054]** Durch die Verwendung eines Ultrasonic-Beacon-basierten Lokalisationssystems als erstes Lokalisationssystem kann der Werker innerhalb von Gebäuden im Zentimeter-Bereich (ca. 2 cm) lokalisiert werden. Für eine genaue Lokalisation im dreidimen-

sionalen Raum werden dabei mindestens drei Basisstationen benötigt, die auch als Kurzstreckenfunkbaaken bezeichnet werden. Diese Kurzstreckenfunkbaaken werden räumlich verteilt im Umfeld des Arbeitsplatzes des Werkers angebracht. Auch ein UWB-basiertes Lokalisationssystem ermöglicht die Bestimmung der Position des Werkers innerhalb von Gebäuden im Zentimeter-Bereich. Die Vorteile der Nutzung der UWB-Übertragungstechnik liegen in der außerordentlich hohen Präzision.

**[0055]** In der hier beschriebenen Ausführungsform wird sowohl durch das erste Lokalisationssystem als auch durch das zweite Lokalisationssystem der Referenzpunkt RP des Werkers **1** und damit der Ort des Koordinatensystems WK berechnet. Diese Berechnung erfolgt beispielsweise in einer vorgegebenen Basisstation der Basisstationen des ersten bzw. zweiten Lokalisationssystems, wobei die Laufzeiten von anderen Basisstationen zu der vorgegebenen Basisstation übermittelt werden, die dann über Triangulation die Referenzposition bestimmt.

**[0056]** Die Lokalisationsdaten LD in der Form der Referenzpositionen des ersten und zweiten Lokalisationssystems werden in der hier beschriebenen Ausführungsform drahtgebunden oder ggf. auch drahtlos an den Rechner **8** übertragen, wie in **Fig. 1** angedeutet ist. In dem Rechner **8** wird ein kontinuierlicher Vergleich der Lokalisationsergebnisse des ersten und des zweiten Lokalisationssystems durchgeführt. Auf diese Weise lassen sich Messfehler identifizieren und die ermittelte Referenzposition des Menschen kann bestätigt oder korrigiert werden. Bei zu großen Abweichungen ist es ferner möglich, dass durch den Rechner **8** ein Befehl an die Robotersteuerung **9** zum Anhalten des Roboters **3** gegeben wird. Darüber hinaus können die Messdaten der jeweiligen Lokalisationssysteme, die mitunter zu springenden Positionen des Werkers führen können, unter anderem mit Filteralgorithmen, wie z.B. einem Kalman-Filter, bereinigt werden und somit die Ergebnisqualität verbessert werden.

**[0057]** In einer abgewandelten Ausführungsform des in **Fig. 3** gezeigten Lokalisationssystems kann die Lokalisation auch derart ausgestaltet sein, dass die Bestimmung der Referenzposition für das erste und zweite Lokalisationssystem in einem der Transponder **501** bzw. **502** erfolgt, die der Werker **1** mit sich trägt. Die Referenzposition wird in diesem Fall von dem entsprechenden Transponder an die Rechen- und Kommunikationseinheit **6** übermittelt. Dabei wird die Laufzeitmessung von dem entsprechenden Transponder durchgeführt, wobei die Laufzeit von drahtlosen Signalen von den jeweiligen Transpondern zu den jeweiligen Basisstationen und dann wieder zurück zu den Transpondern gemessen wird. Die von den Transpondern ermittelten Referenzpositionen werden mit der Rechen- und Kommunikations-

einheit **6** drahtlos an die Empfangseinheit **7** übertragen.

**[0058]** Wie bereits oben erwähnt, ist die Rechen- und Kommunikationseinheit **6** als funktional sicherer Mikrocontroller ausgestaltet. Somit kann dieser Mikrocontroller neben dem Abgleich der Sensordaten der Faser-Bragg-Gitter-Sensoren auch einen Abgleich der separat ermittelten Referenzpositionen der beiden Lokalisationssysteme durchführen. Eine drahtlose Übertragung der entsprechenden Referenzpositionen hin zu der Empfangseinheit **7** erfolgt dabei nur dann, wenn die Ergebnisse beider Lokalisationssysteme eine ausreichende Übereinstimmung aufweisen, wobei eine ausreichende Übereinstimmung basierend auf einem Schwellwertkriterium definiert sein kann. Ist dieses Schwellwertkriterium nicht erfüllt, wird ein Fehlercode zu der Empfangseinheit **7** übermittelt.

**[0059]** Mittels der lokalen Positionswerte POS der Faser-Bragg-Gitter-Sensoren sowie den Lokalisationsdaten LD betreffend die Referenzposition RP des Werkers **1** werden in dem Rechner **8** Bewegungsdaten BD bestimmt, welche entsprechende Positionswerte (d.h. die Position und Orientierung) der Körperteile des Werkers **1** im globalen Koordinatensystem KS zu aufeinander folgenden Zeitpunkten angeben. Die Bewegungsdaten BD entsprechen einem digitalen Menschmodell des Werkers **1** und beschreiben seine Bewegungen im Raum.

**[0060]** Darüber hinaus werden in der Ausführungsform der **Fig. 1** von der Robotersteuerung **9** kinematische Steuerdaten KD an den Rechner **8** übermittelt. Die kinematischen Steuerdaten sind dabei an sich bekannte Daten und dienen zur Steuerung der Bewegungen der einzelnen beweglichen Bauteile **301** bis **304** des Roboters **3** relativ zu der festen, dem Roboter **3** zugeordneten Referenzposition RP'. Die beweglichen Bauteile des Roboters **3** sind in der Ausführungsform der **Fig. 1** die drei aneinander angelenkten Roboterarme **301**, **302** und **303** sowie der am Roboterarm **303** befestigte Greifer **304**. Aus den kinematischen Steuerdaten KD ermittelt der Rechner **8** in an sich bekannter Weise unter Zugriff auf das Kinematik-Modell des Roboters **3** entsprechende Bewegungsdaten **BD'** (d.h. zeitlich aufeinander folgende Positionswerte in der Form von Position und Orientierung) der beweglichen Bauteile des Roboters in Bezug auf das globale Koordinatensystem KS. Die Bewegungsdaten **BD'** entsprechen einem digitalen Robotermodell des Roboters **3** und beschreiben dessen Bewegungen im Raum.

**[0061]** In der hier beschriebenen Ausführungsform wird unter Verwendung der Bewegungsdaten **BD** und **BD'** bestimmt, wie groß der minimale Abstand  $d_{min}$  zwischen dem Werker **1** und dem Roboter **3** ist. In Abhängigkeit von diesem minimalen Abstand werden

dann durch den Rechner **8** Steuerdaten CD an die Robotersteuerung **9** gegeben, um auf die Bewegung des Roboters Einfluss zu nehmen. Dabei wird die Geschwindigkeit der Bewegung des Roboters umso kleiner eingestellt, je geringer der minimale Abstand  $d_{min}$  zwischen Werker **1** und Roboter **3** ist. Auf diese Weise wird die Gefahr von Kollisionen zwischen Roboter und Werker vermindert. Darüber hinaus besteht auch die Möglichkeit, dass im Falle, dass der minimale Abstand  $d_{min}$  einen Schwellenwert unterschreitet, ein Steuerbefehl von dem Rechner **8** an die Robotersteuerung **9** gegeben wird, der ein Anhalten des Roboters zur Vermeidung von Kollisionen bewirkt.

**[0062]** Gegebenenfalls besteht auch die Möglichkeit, dass mittels des digitalen Menschmodells basierend auf den Bewegungsdaten **BD** bzw. mittels des digitalen Robotermodells basierend auf den Bewegungsdaten **BD'** weitere Assistenzfunktionen bereitgestellt werden. Beispielsweise können anhand des digitalen Menschmodells unergonomische Arbeitshaltungen des Werkers identifiziert werden. Der Werker kann dann über ein geeignetes Informationssystem darüber aufgeklärt werden, wie er zukünftig seine Arbeit ergonomischer verrichten kann. Ebenfalls ist es denkbar, dass nach dem Erkennen einer unergonomischen Haltung des Werkers der Roboter dahingehend gesteuert wird, dass die Arbeitshöhe, in welcher der Werker arbeitet, bzw. die Höhe eines angelegten Werkstücks an die Körpergröße des Werkers angepasst wird und so eine ergonomische Haltung ermöglicht wird.

**[0063]** In einer weiteren Ausführungsform wird bei der Berechnung der minimalen Distanz zwischen Werker und Roboter auch berücksichtigt, ob der Roboter aktuell ein Werkstück an seinem Greifer **303** hält. Diese Information kann ebenfalls aus den kinematischen Steuerdaten des Roboters erhalten werden. In diesem Fall enthalten die kinematischen Steuerdaten die CAD-Daten des Werkstücks. Ergibt sich, dass der Roboter am Greifer ein Werkstück hält, fließt dies bei der Berechnung der minimalen Distanz zwischen Mensch und Roboter derart ein, dass auch vermieden wird, dass der Werker mit dem gehaltenen Werkstück kollidiert. Mit anderen Worten wird in diesem Fall das Werkstück derart behandelt, als ob es Bestandteil des robotischen Systems wäre.

**[0064]** Im Vorangegangenen wurde eine Ausführungsform beschrieben, bei der die Bewegungsdaten des Roboters aus seinen kinematischen Steuerdaten abgeleitet werden. Alternativ oder zusätzlich ist es jedoch auch möglich, dass das Konzept der körpernahen Sensorik des Werkers auf den Roboter übertragen wird. In diesem Fall werden analog zum Werker entsprechende Faser-Bragg-Gitter-Sensoren an den beweglichen Bauteilen des Roboters über seine Gelenke hinweg fixiert, z.B. mittels Gurten, Klettbandern und dergleichen. Mit anderen Worten wird

der Roboter mit einer roboternahen Sensorik versehen, die in **Fig. 1** lediglich schematisch durch eine gestrichelte Linie mit Bezugszeichen **12** angedeutet ist. Die Sensorfasern der Faser-Bragg-Gitter-Sensoren geben dann die relative Verformung bezüglich ihres lokalen Koordinatenursprungs aus. Folglich müssen die Sensorfasern, die jeweils die Gelenke des Roboters abdecken, in einer Beziehung zueinander und zu einem gemeinsamen Koordinatensystem gesetzt werden. Ausschlaggebend hierfür sind festgelegte statische Distanzen zwischen den Anfangs- und Endpunkten oder ein definierter Anfang der Sensorfaser am Roboter.

**[0065]** Genauso wie bei der körpernahen Sensorik werden die Daten der Faser-Bragg-Gitter wieder in einer Schnittstelleneinheit zusammengeführt und anschließend an eine Rechen- und Kommunikationseinheit weitergeleitet. Diese Einheit kann in Analogie zur körpernahen Sensorik wiederum einen sicheren Mikrocontroller mit redundanten Prozessen enthalten. Der Mikrocontroller leitet die Daten der roboternahen Sensorik an den Rechner **8** weiter, die dann das digitale Robotermodell in der Form von Bewegungsdaten **BD'** bestimmt.

**[0066]** In der Ausführungsform der **Fig. 1** ist die Referenzposition **RP'** des Roboters **3** fest und vorbekannt, so dass auf ein Lokalisationssystem zur Bestimmung dieser Referenzposition verzichtet werden kann. Im Falle, dass der Roboter als Ganzes beweglich ist, kann jedoch auch die (aktuelle) Referenzposition **RP'** in Analogie zur Referenzposition **RP** des Werkers mittels eines Lokalisationssystems ermittelt werden und dann mit den lokalen Positionen der Faser-Bragg-Gitter-Sensoren verrechnet werden, um hierdurch Positionsdaten der beweglichen Bauteile des Roboters in Bezug auf das ortsfeste Koordinatensystem **KS** zu erhalten. In einer weiteren Ausgestaltung können die lokalen Positionen auch durch am Roboter angebrachte Transponder des im Vorangegangenen beschriebenen Lokalisationssystems bestimmt werden.

**[0067]** Je nach Ausgestaltung können die Sensorfasern der Faser-Bragg-Gitter-Sensoren auf verschiedene Weise an den Roboter angelegt werden, z.B. geradlinig, spiralförmig und dergleichen. Ferner kann die Zuverlässigkeit der ermittelten Positionsdaten durch Benutzung weiterer Sensoren wie Lagesensoren, Beschleunigungssensoren, Inertialsensoren und dergleichen weiter verbessert werden, wie dies auch bei der oben beschriebenen körpernahen Sensorik realisiert werden kann.

**[0068]** Die anhand von **Fig. 1** erläuterten Komponenten, d.h. alle Komponenten bis auf die weiter unten beschriebenen Komponenten **10** und **11**, stellen einen sog. Sicherheitszyklus des Gesamtsystems aus Werker und Roboter dar. Der Sicherheitszyklus

beinhaltet alle sicherheitsrelevanten Komponenten des Systems. Hierzu gehören die körpernahe Sensorik mit den Sensoren **2** in Kombination mit dem Lokalisationssystem **4, 5** zur Erfassung der Bewegung des Werkers, die kinematischen Steuerdaten KD aus der Robotersteuerung **9** bzw. optional aus einer roboternahen Sensorik sowie die Rechen- und Kommunikationseinheit **6**, die Empfangseinheit **7**, der Rechner **8** und die Robotersteuerung **9**. Durch diese Komponenten werden Bewegungsdaten sowohl für den Werker als auch für den Roboter sicher erfasst und an den Rechner **8** übermittelt. Dort findet der sicherheitsrelevante Teil der Fusion der Daten statt, d.h. mittels der Daten wird ein kombiniertes Mensch-Maschine-Modell erstellt und sicherheitsrelevante Distanzen zwischen Mensch und robotischem System berechnet. Anhand dieser Berechnung erfolgt dann die distanzabhängige Geschwindigkeitssteuerung des Roboters, indem Steuerdaten bzw. Steuerbefehle CD von dem Rechner **8** an die Robotersteuerung **9** übermittelt werden.

**[0069]** Neben diesem Sicherheitszyklus gibt es in dem System der **Fig. 1** einen weiteren nichtsicheren Mehrwertzyklus, der im Folgenden erläutert wird und einen wesentlichen Aspekt der Erfindung darstellt. Zur Realisierung dieses Mehrwertzyklus werden die Bewegungsdaten **BD** und **BD'** über eine geeignete Schnittstelle an eine weitere Rechneinrichtung **10** übermittelt. Vorzugsweise erfolgt die Übertragung dieser Daten über das Internet und die Rechneinrichtung **10** ist ein Internetserver. Die Kommunikation des Rechners **8** bzw. einer entsprechenden Schnittstelle mit dem Internetserver kann beispielsweise mittels sog. Representational State Transfer Services (REST) erfolgen. Der Internetserver **10** kann ggf. auch eine cloudbasierte Rechner- und Speichereinrichtung sein. Auf dem Server **10** werden die Bewegungsdaten **BD** und **BD'** dann weiterverarbeitet.

**[0070]** Die Weiterverarbeitung der Bewegungsdaten **BD** und **BD'** durch den Internetserver **10** ist in **Fig. 4** dargestellt. Die Bewegungsdaten **BD** sind dabei eine zeitliche Abfolge von Positionsdaten der jeweiligen Körperteile des Werkers **1** in Bezug auf das Koordinatensystem KS, wohingegen die Bewegungsdaten **BD'** eine zeitliche Abfolge von Positionsdaten der jeweiligen beweglichen Bauteile des Roboters **3** in Bezug auf das Koordinatensystem KS darstellen. Wie sich aus **Fig. 4** ergibt, werden aus den Bewegungsdaten **BD** und **BD'** in einem Schritt **S1** zunächst (zeitliche) Segmente SE umfassend erste Segmente SE1 und zweite Segmente SE2 gewonnen. Die ersten Segmente SE1 stammen aus dem zeitlichen Strom der Bewegungsdaten **BD**, wohingegen die zweiten Segmente SE2 aus dem zeitlichen Strom der Bewegungsdaten **BD'** hervorgehen.

**[0071]** Die Einteilung der Bewegungsdaten **BD** und **BD'** in entsprechende Segmente kann mit an sich

bekanntesten Methoden durchgeführt werden. Im einfachsten Fall wird ein Zeitfenster vorbestimmter Größe verwendet und aufeinander folgend alle Positionsdaten innerhalb dieses Fensters einem Segment zugeordnet. Gegebenenfalls kann die Segmentierung auch unter Verwendung einer an sich bekannten Assoziationsanalyse erfolgen, bei der Korrelationen in den Positionsdaten erkannt werden. Die Implementierung einer Assoziationsanalyse zur Ermittlung des Segmente SE1 und SE2 liegt im Rahmen von fachmännischem Handeln.

**[0072]** Nachdem erste Segmente SE1 und zweite Segmente SE2 aus den Bewegungsdaten **BD** und **BD'** extrahiert wurden, wird im nächsten Schritt **S2** eine Mustererkennung sowohl für die ersten Segmente SE1 als auch für die zweiten Segmente SE2 durchgeführt. Hierdurch werden Bewegungsmuster **BM** umfassend erste Bewegungsmuster **BM1** und zweite Bewegungsmuster **BM2** erhalten. Die ersten Bewegungsmuster **BM1** werden aus den ersten Segmenten SE1 betreffend die Bewegung des Werkers extrahiert, wohingegen die zweiten Bewegungsmuster **BM2** aus den zweiten Segmenten SE2 betreffend die Bewegung des Roboters gewonnen werden. Die Bewegungsmuster werden mit Hilfe einer Datenbank **DB** ermittelt, in der eine Vielzahl von vorgegebenen Bewegungsmustern **BM'** enthalten sind. Ein jeweiliges vorgegebenes Bewegungsmuster umfasst dabei ein oder mehrere zeitlich aufeinander folgende Segmente sowie eine Spezifikation der dem Bewegungsmuster zugeordneten Bewegung, d.h. einen bestimmten Bewegungstyp, wie z.B. Bewegung des Fingers des Werkers, Anheben des Arms, Vorbeugen, Bewegung des Greifers des Roboters und dergleichen. Es gibt in der Datenbank **DB** Bewegungsmuster sowohl für die Bewegung des Werkers als auch für die Bewegung des Roboters.

**[0073]** In Schritt **S2** wird eine an sich bekannte Mustererkennung verwendet, um die in den aufeinander folgenden Segmenten SE1 bzw. SE2 enthaltenen ersten bzw. zweiten Bewegungsmuster **BM1** und **BM2** durch Vergleich mit den vorgegebenen Bewegungsmustern **BM'** der Datenbank **DB** zu erhalten. Die Implementierung einer geeigneten Mustererkennung liegt im Rahmen von fachmännischem Handeln und kann beispielsweise auf einer Cluster-Analyse basieren. Vorzugsweise werden die erkannten Muster **BM1** und **BM2** als neu hinzukommende Muster in der Datenbank **DB** abgelegt, so dass die Anzahl der Muster **BM'** in der Datenbank erhöht wird und die Mustererkennung kontinuierlich verbessert wird.

**[0074]** In einem nächsten Schritt **S3** werden die jeweiligen Bewegungsmuster **BM1** und **BM2** einem datengetriebenen Modell **MO** zugeführt, das zuvor über geeignete Trainingsdaten **TD** trainiert wurde. In der hier beschriebenen Ausführungsform besteht das datengetriebene Modell **MO** aus einem ersten Modell,

dem eine vorgegebene Anzahl von zeitlich aufeinander folgenden ersten Bewegungsmuster BM1 als Eingabedaten zugeführt wird, und aus einem zweiten Modell, dem eine vorgegebene Anzahl von zeitlich aufeinander folgenden zweiten Bewegungsmustern BM2 als Eingabedaten zugeführt wird. Mit anderen Worten läuft ein Zeitfenster mit vorgegebener Größe (sog. Sliding Window) über die zeitliche Sequenz der ersten bzw. zweiten Bewegungsmuster, wobei die in der jeweiligen Position des Zeitfensters darin enthaltenen ersten bzw. zweiten Bewegungsmuster die Eingabedaten des entsprechenden datengetriebenen Modells bilden.

**[0075]** Als Ausgabe der jeweiligen datengetriebenen Modelle erhält man dann Aktivitäten AK, wobei erste Aktivitäten AK1 für entsprechende Bewegungsmuster BM1 und zweite Aktivitäten AK2 für entsprechende Bewegungsmuster BM2 erhalten werden. Durch die Aktivitäten erfolgt somit eine Klassifikation der Bewegungsmuster. Als Trainingsdaten für das jeweilige Modell wurden dabei bekannte Kombinationen von aufeinander folgenden ersten bzw. zweiten Bewegungsmustern gemäß dem Zeitfenster mit bekannter zugeordneter Aktivität verwendet. Die Aktivitäten geben dabei jeweilige Arbeitstätigkeiten des Werkers 1 (Aktivitäten AK1) bzw. Arbeitstätigkeiten des Roboters 3 (Aktivitäten AK2) im Kontext des betrachteten Arbeitsablaufs wieder (z.B. Greifen einer Schraube, Bewegung eines Werkstücks und dergleichen).

**[0076]** In der hier beschriebenen Variante beruht das datengetriebene Modell MO auf einer neuronalen Netzstruktur, die in an sich bekannter Weise mittels maschinellen Lernens basierend auf den Trainingsdaten TD gelernt ist. Die neuronale Netzstruktur enthält dabei ein oder mehrere neuronale Netze aus künstlichen Neuronen mit einer hohen Anzahl an versteckten Zwischenschichten (hidden layers), die über Deep Learning gelernt werden. Alternativ können auch andere datengetriebene Modelle in der Form entsprechender Klassifikations- bzw. Regressionsverfahren in Schritt S3 genutzt werden. Auch diese Modelle sind in geeigneter Weise über maschinelles Lernen basierend auf Trainingsdaten gelernt.

**[0077]** Nach der Identifikation der Aktivitäten AK1 und AK2 können diese abgespeichert und bei Bedarf über eine Benutzerschnittstelle 11 ausgegeben werden. Die Benutzerschnittstelle ist in Fig. 1 beispielhaft als visuelle Benutzerschnittstelle in der Form eines Bildschirms angedeutet. Die Benutzerschnittstelle ist vorzugsweise für den Arbeiter einsehbar, so dass er hierüber Informationen zu seinen Aktivitäten bzw. den Aktivitäten des Roboters erhält.

**[0078]** In der Ausführungsform der Fig. 4 werden die Aktivitäten AK in einem Schritt S4 noch weiterverarbeitet. In diesem Schritt wird ein Process-Mining PM durchgeführt. Process-Mining ist dabei an

sich bekannt und beschreibt Techniken im Bereich des Prozessmanagements, welche die Analyse von Geschäftsprozessen auf Basis von Ereignisprotokollen unterstützen. Dieses Process-Mining wird nunmehr auf die Aktivitäten AK angewendet, wobei die Implementierung von Process-Mining für solche Aktivitäten im Rahmen von fachmännischem Handeln liegt. Zum Beispiel kann das Open-Source-Framework „ProM“ hinzugezogen werden, um das Process-Mining umzusetzen. Process-Mining nutzt Techniken der Trenderkennung, Musteranalyse und Leistungsanalyse, um Geschäftsprozesse durch die Analyse der erzeugten Daten zu rekonstruieren und zu verbessern. Dieser Ansatz ermöglicht es, Prozesse von unten nach oben zu verbessern und zu automatisieren, auch wenn das zugrunde liegende Prozessmodell nicht bekannt oder sehr variabel ist. Als Ergebnis erhält man schließlich Informationen zu Arbeitsprozessen PR, die durch die Aktivitäten AK repräsentiert werden. In diesem Sinne werden eine oder mehrere zeitlich aufeinander folgende Aktivitäten als Arbeitsprozesse klassifiziert.

**[0079]** In einer konkreten Implementierung des Process-Minings PM werden dem Mining als Eingabedaten die Aktivitäten AK sowie ein oder mehrere vorgegebene Referenz-Arbeitsprozesse zugeführt. Die Referenz-Arbeitsprozesse sind dabei in der Form von Modellen in einer Datenbank abgelegt. Ein Referenz-Arbeitsprozess kann beispielsweise ein Montageprozess im Rahmen einer Mensch-Roboter-Kollaboration sein.

**[0080]** Über bekannte Data-Mining-Techniken werden dann Informationen zu den Arbeitsprozessen gewonnen. In an sich bekannter Weise kann dabei eine Prozessidentifizierung, ein Prozessvergleich und eine Prozessoptimierung durchgeführt werden. Bei einer Prozessidentifizierung kann eine Sequenz- und Assoziationsmusteranalyse durchgeführt werden, wohingegen bei einem Prozessvergleich eine Mustererkennung (englisch: Pattern Matching) das geeignete Verfahren darstellt. Bei der Mustererkennung werden Aktivitäten des Ist-Prozesses mit den Aktivitäten eines oder mehrerer Referenz-Arbeitsprozesse verglichen. Als Ergebnis des Process-Minings erhält man einen oder mehrere identifizierte Arbeitsprozesse, das Ergebnis des Vergleichs der identifizierten Arbeitsprozessen mit Referenz-Arbeitsprozessen sowie Optimierungspotentiale für den identifizierten Prozess. Diese Informationen werden gespeichert und können bei Bedarf oder auch in Echtzeit über die Benutzerschnittstelle 11 zur Assistenz des Arbeiters ausgegeben werden.

**[0081]** Die im Vorangegangenen beschriebenen Ausführungsformen der Erfindung weisen eine Reihe von Vorteilen auf. Insbesondere werden robuste faseroptische Sensorverfahren basierend auf Faser-Bragg-Gitter-Sensoren mit hochfrequenten kom-

munikationstechnischen Verfahren zur Ortung kombiniert. Auf diese Weise werden Störeinflüsse, z.B. elektromagnetische Felder, Tageslicht, Frequenzbänder vorhandener IT-Netzwerke und dergleichen, minimiert. Durch die Kombination dieser beiden Verfahren werden die technischen industriellen Anforderungen an Echtzeitfähigkeit, Ortungsgenauigkeit und Messauflösung, Robustheit und Unempfindlichkeit gegen Störeinflüsse, Systemneutralität sowie nahtlose Integration in die Arbeitsumgebung erfüllt. Die körpernahe Sensorik ist darüber hinaus so ausgelegt, dass sie als funktional sicheres System angesehen werden kann. Dies wird durch die redundante Auslegung von Einzelkomponenten (mindestens zwei Sensoren an einer Messstelle) und durch den Einsatz funktional sicherer Mikrocontroller erreicht.

**[0082]** In einer Ausgestaltung wird auch der Roboter mit einer Sensorkombination in Analogie zur körpernahen Sensorik des Werkers ausgestattet. Dies führt dazu, dass zu jedem Zeitpunkt die Position des Roboters ermittelt werden kann. Auf diese Weise können unabhängig vom Hersteller die entsprechenden Positionsdaten des Roboters ohne Zugriff auf eine proprietäre Schnittstelle ermittelt werden. Nichtsdestotrotz ist es ggf. auch möglich, die Positionsdaten direkt aus der Steuerung des robotischen Systems auszulesen.

**[0083]** Die Erfindung ermöglicht darüber hinaus durch die Verwendung datengetriebener Modelle, die mit entsprechenden maschinellen Lernverfahren gelernt sind, Aktivitäten aus den erfassten Bewegungsdaten des Werkers und des Roboters abzuleiten. Darüber hinaus können diese Aktivitäten ggf. auch mit einem bekannten Verfahren des Process-Minings weiterverarbeitet werden, um hierdurch weitergehende Informationen zu den Arbeitsprozessen des Werkers in Wechselwirkung mit dem robotischen System zu erhalten.

### Patentansprüche

1. Verfahren zur rechnergestützten Erfassung und Auswertung eines Arbeitsablaufs, bei dem ein menschlicher Werker (1) und ein robotisches System (3) wechselwirken, wobei:

- basierend auf einer Erfassung mittels einer ersten Sensorik (2, 4, 5) digitale Bewegungsdaten (BD) des Werkers (1) ermittelt werden, welche eine Vielzahl von ersten Positionsdatensätzen für eine Vielzahl von aufeinander folgenden Zeitpunkten enthalten, wobei ein jeweiliger erster Positionsdatensatz Positionswerte zur Beschreibung der Position und Orientierung von Körperteilen (101, 102, 103) des Werkers (1) in einem ortsfesten Koordinatensystem (KS) zum jeweiligen Zeitpunkt enthält;
- basierend auf einer Erfassung mittels einer zweiten Sensorik (12) und/oder basierend auf kinematischen Steuerdaten (KD) des robotischen Systems (3) digi-

tale Bewegungsdaten (BD') des robotischen Systems (3) ermittelt werden, welche eine Vielzahl von zweiten Positionsdatensätzen für eine Vielzahl von aufeinander folgenden Zeitpunkten enthalten, wobei ein jeweiliger zweiter Positionsdatensatz Positionswerte zur Beschreibung der Position und Orientierung von beweglichen Bauteilen (301, 302, 303, 304) des robotischen Systems (3) in dem ortsfesten Koordinatensystem zum jeweiligen Zeitpunkt enthält;

- aus den digitalen Bewegungsdaten (BD, BD') des Werkers (1) und des robotischen Systems (3) Bewegungsmuster (BM) ermittelt werden, welche in den digitalen Bewegungsdaten (BD, BD') enthalten sind und welche erste Bewegungsmuster (BM1) und zweite Bewegungsmuster (BM2) umfassen, wobei die ersten Bewegungsmuster (BM1) jeweils einer Bewegung des Werkers (1) aus einer Vielzahl von vorgegebenen Bewegungen des Werkers (1) zugeordnet sind und die zweiten Bewegungsmuster (BM2) jeweils einer Bewegung des robotischen Systems (3) aus einer Vielzahl von vorgegebenen Bewegungen des robotischen Systems (3) zugeordnet sind, wobei die Extraktion der Bewegungsmuster (BM) auf einer Mustererkennung unter Zugriff auf vorbekannte Bewegungsmuster (BM') basiert;

- die ermittelten Bewegungsmuster (BM) als Eingabedaten einem datengetriebenen Modell (MO) zugeführt werden, das über maschinelles Lernen basierend auf Trainingsdaten (TD) gelernt ist, wobei das datengetriebene Modell (MO) als Ausgabedaten Aktivitäten (AK) bestimmt, die erste und zweite Aktivitäten (AK1, AK2) enthalten, wobei die ersten Aktivitäten (AK1) Klassen bilden, die jeweils ein oder mehrere erste Bewegungsmuster (BM) als eine Arbeitstätigkeit des Werkers (1) aus einer Mehrzahl von vorgegebenen Arbeitstätigkeiten des Werkers (1) spezifizieren, und wobei die zweiten Aktivitäten (AK2) Klassen bilden, welche jeweils ein oder mehrere zweite Bewegungsmuster (BM) als eine Arbeitstätigkeit des robotischen Systems (3) aus einer Mehrzahl von vorgegebenen Arbeitstätigkeiten des robotischen Systems (3) spezifizieren.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass im Rahmen der Ermittlung der Bewegungsmuster (BM) zunächst aus den digitalen Bewegungsdaten (BD, BD') des Werkers (1) und des robotischen Systems (3) Segmente (SE) extrahiert werden, welche erste Segmente und zweite Segmente (SE1, SE2) umfassen, wobei die ersten Segmente (SE1) jeweils erste Positionsdatensätze für mehrere aufeinander folgende Zeitpunkte und die zweiten Segmente (SE2) jeweils zweite Positionsdatensätze für mehrere aufeinander folgende Zeitpunkte umfassen, wobei anschließend aus den Segmenten (SE) die Bewegungsmuster (BM) extrahiert werden, wobei die ersten Bewegungsmuster (BM1) jeweils ein oder mehrere erste zeitlich aufeinander folgende Segmente (SE1) umfassen und die zweiten Bewegungsmus-

ter (BM2) jeweils ein oder mehrere zweite zeitlich aufeinander folgende Segmente (SE2) umfassen.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Aktivitäten (AK) einem Process-Mining (PM) unterzogen werden, wodurch Informationen zu einem oder mehreren Arbeitsprozessen (PR) gewonnen werden, die durch die Aktivitäten (AK) repräsentiert werden und im Arbeitsablauf enthalten sind.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass basierend auf den Aktivitäten (AK) und/oder den Informationen zu dem oder den Arbeitsprozessen (PR) eine Ausgabe über eine Benutzerschnittstelle (11) zur Assistenz des Werkers (1) generiert wird.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das datengetriebene Modell (MO) auf einem oder mehreren neuronalen Netzen und/oder auf einem oder mehreren Bayesschen Netzen und/oder auf Support Vector Machines und/oder auf Entscheidungsbäumen beruht.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die erste Sensorik (2, 4, 5) eine Vielzahl von körpernahen Sensoren (2) umfasst, die am Körper des Werkers (1) angebracht sind und/oder dass die zweite Sensorik (12) eine Vielzahl von roboternahen Sensoren umfasst, die an einem oder mehreren beweglichen Bauteilen (301, 302, 303, 304) der robotischen Einrichtung (3) angebracht sind.

7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass über die Erfassung mittels der ersten Sensorik (2, 4, 5) für ein jeweiliges Körperteil (101, 102, 103) lokale Positionswerte in einem lokalen Koordinatensystem (LK) ermittelt werden, das dem jeweiligen Körperteil (101, 102, 103) zugeordnet ist, wobei die Positionswerte der ersten Positionswerte von den lokalen Positionswerten und einem Positionswert eines Referenzpunkts (RP) des Werkers (1) im ortsfesten Koordinatensystem (KS) abhängen, wobei der Referenzpunkt (RP) des Werkers (1) eine feste Positionsbeziehung zu den lokalen Koordinatensystemen (LK) hat, und/oder dass über die Erfassung mittels der zweiten Sensorik (12) und/oder aus den kinematischen Steuerdaten (KD) für ein jeweiliges bewegliches Bauteil (301, 302, 303, 304) des robotischen Systems (3) lokale Positionswerte in einem lokalen Koordinatensystem ermittelt werden, das dem jeweiligen beweglichen Bauteil (301, 302, 303, 304) zugeordnet ist, wobei die Positionswerte der zweiten Positionswerte von den lokalen Positionswerten und einem Positionswert eines Referenzpunkts (RP') des robotischen Systems (3) im ortsfesten Koordinatensystem (KS) ab-

hängen, wobei der Referenzpunkt (RP') des robotischen Systems (3) eine feste Positionsbeziehung zu den lokalen Koordinatensystemen hat.

8. Verfahren nach Anspruch 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass die erste Sensorik (2, 4, 5) eine Lokalisationssensorik (4, 5) umfasst, mit welcher der Positionswert des Referenzpunkts (RP) des Werkers (1) im ortsfesten Koordinatensystem (KS) mithilfe einer Ortung basierend auf drahtlos übertragenen Signalen erfasst wird, und/oder dass die zweite Sensorik (12) eine Lokalisationssensorik umfasst, mit welcher der Positionswert des Referenzpunkts (RP') des robotischen Systems (3) im ortsfesten Koordinatensystem (KS) mithilfe einer Ortung basierend auf drahtlos übertragenen Signalen erfasst wird.

9. Verfahren nach Anspruch 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Lokalisationssensorik (4, 5) der ersten Sensorik (2, 4, 5) und/oder die Lokalisationssensorik der zweiten Sensorik (12) auf einer Ortung mittels Ultraschallsignalen und/oder mittels elektromagnetischer Hochfrequenzsignale, basiert.

10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass zumindest ein Teil der ersten Sensorik (2, 4, 5) redundant ausgelegt ist, so dass durch die erste Sensorik (2, 4, 5) ein oder mehrere Sätze von redundanten Messwerten erhalten werden, wobei die redundanten Messwerte eines jeweiligen Satzes unabhängig voneinander erfasst wurden und im Falle, dass die redundanten Messwerte eines jeweiligen Satzes um ein vorbestimmtes Maß voneinander abweichen, eine oder mehrere vorgegebene Aktionen automatisch ausgeführt werden, und/oder dass zumindest ein Teil der zweiten Sensorik (12) redundant ausgelegt ist, so dass durch die zweite Sensorik (12) ein oder mehrere Sätze von redundanten Messwerten erhalten werden, wobei die redundanten Messwerte eines jeweiligen Satzes unabhängig voneinander erfasst wurden und im Falle, dass die redundanten Messwerte eines jeweiligen Satzes um ein vorbestimmtes Maß voneinander abweichen, eine oder mehrere vorgegebene Aktionen automatisch ausgeführt werden.

11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass überwacht wird, ob in regelmäßigen Zeitabständen Messwerte der ersten Sensorik (2, 4, 5) und/oder der zweiten Sensorik (12) über eine Datenübertragungsstrecke übermittelt werden, wobei im Falle, dass die regelmäßigen Zeitabstände nicht eingehalten werden, eine oder mehrere vorgegebene Aktionen automatisch ausgeführt werden.

12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass aus den digitalen Bewegungsdaten (BD) des Werkers (1) und den digitalen Bewegungsdaten (BD') des robotischen

Systems (3) der minimale Abstand ( $d_{min}$ ) zwischen Werker (1) und robotischem System (3) berechnet wird und das robotische System (3) in Abhängigkeit von dem berechneten minimalen Abstand ( $d_{min}$ ) gesteuert wird.

13. Verfahren nach Anspruch 12, **dadurch gekennzeichnet**, dass basierend auf der Erfassung mittels der zweiten Sensorik (12) und/oder aus den kinematischen Steuerdaten (KD) des robotischen Systems (3) und/oder basierend auf einer Erfassung mittels einer weiteren Sensorik ferner abgeleitet wird, ob zum jeweiligen Zeitpunkt ein oder mehrere Werkstücke mit vorbestimmten Abmessungen durch das robotische System (3) gehalten werden, wobei die vorbestimmten Abmessungen von gehaltenen Werkstücken bei der Berechnung des minimalen Abstands ( $d_{min}$ ) dadurch berücksichtigt werden, dass das oder die gehaltenen Werkstücke als Teil des robotischen Systems (3) behandelt werden.

14. Vorrichtung zur rechnergestützten Erfassung und Auswertung eines Arbeitsablaufs, bei dem ein menschlicher Werker (1) und ein robotisches System (3) wechselwirken, wobei die Vorrichtung eine Rechneinrichtung umfasst, wobei die Rechneinrichtung dazu eingerichtet ist, ein Verfahren durchzuführen, bei dem:

- basierend auf einer Erfassung mittels einer ersten Sensorik (2, 4, 5) digitale Bewegungsdaten (BD) des Werkers (1) ermittelt werden, welche eine Vielzahl von ersten Positionsdatensätzen für eine Vielzahl von aufeinander folgenden Zeitpunkten enthalten, wobei ein jeweiliger erster Positionsdatensatz Positionswerte zur Beschreibung der Position und Orientierung von Körperteilen (101, 102, 103) des Werkers (1) in einem ortsfesten Koordinatensystem (KS) zum jeweiligen Zeitpunkt enthält;

- basierend auf einer Erfassung mittels einer zweiten Sensorik (12) und/oder basierend auf kinematischen Steuerdaten (KD) des robotischen Systems (3) digitale Bewegungsdaten (BD') des robotischen Systems (3) ermittelt werden, welche eine Vielzahl von zweiten Positionsdatensätzen für eine Vielzahl von aufeinander folgenden Zeitpunkten enthalten, wobei ein jeweiliger zweiter Positionsdatensatz Positionswerte zur Beschreibung der Position und Orientierung von beweglichen Bauteilen (301, 302, 303, 304) des robotischen Systems (3) in dem ortsfesten Koordinatensystem (KS) zum jeweiligen Zeitpunkt enthält;

- aus den digitalen Bewegungsdaten (BD, BD') des Werkers (1) und des robotischen Systems (3) Bewegungsmuster (BM) ermittelt werden, welche in den digitalen Bewegungsdaten (BD, BD') enthalten sind und welche erste Bewegungsmuster (BM1) und zweite Bewegungsmuster (BM2) umfassen, wobei die ersten Bewegungsmuster (BM1) jeweils einer Bewegung des Werkers (1) aus einer Vielzahl von vorgegebenen Bewegungen des Werkers (1) zugeordnet sind und die zweiten Bewegungsmuster (BM2) je-

weils einer Bewegung des robotischen Systems (3) aus einer Vielzahl von vorgegebenen Bewegungen des robotischen Systems (3) zugeordnet sind, wobei die Extraktion der Bewegungsmuster (BM) auf einer Mustererkennung unter Zugriff auf vorbekannte Bewegungsmuster (BM') basiert;

- die ermittelten Bewegungsmuster (BM) als Eingabedaten einem datengetriebenen Modell (MO) zugeführt werden, das über maschinelles Lernen basierend auf Trainingsdaten (TD) gelernt ist, wobei das datengetriebene Modell (MO) als Ausgabedaten Aktivitäten (AK) bestimmt, die erste und zweite Aktivitäten (AK1, AK2) enthalten, wobei die ersten Aktivitäten (AK1) jeweils ein oder mehrere erste Bewegungsmuster (BM) als eine Arbeitstätigkeit des Werkers (1) aus einer Mehrzahl von vorgegebenen Arbeitstätigkeiten des Werkers (1) klassifizieren und wobei die zweiten Aktivitäten (AK2) jeweils ein oder mehrere zweite Bewegungsmuster (BM) als eine Arbeitstätigkeit des robotischen Systems (3) aus einer Mehrzahl von vorgegebenen Arbeitstätigkeiten des robotischen Systems (3) klassifizieren.

15. Vorrichtung nach Anspruch 14, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Vorrichtung zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 2 bis 13 eingerichtet ist.

Es folgen 4 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

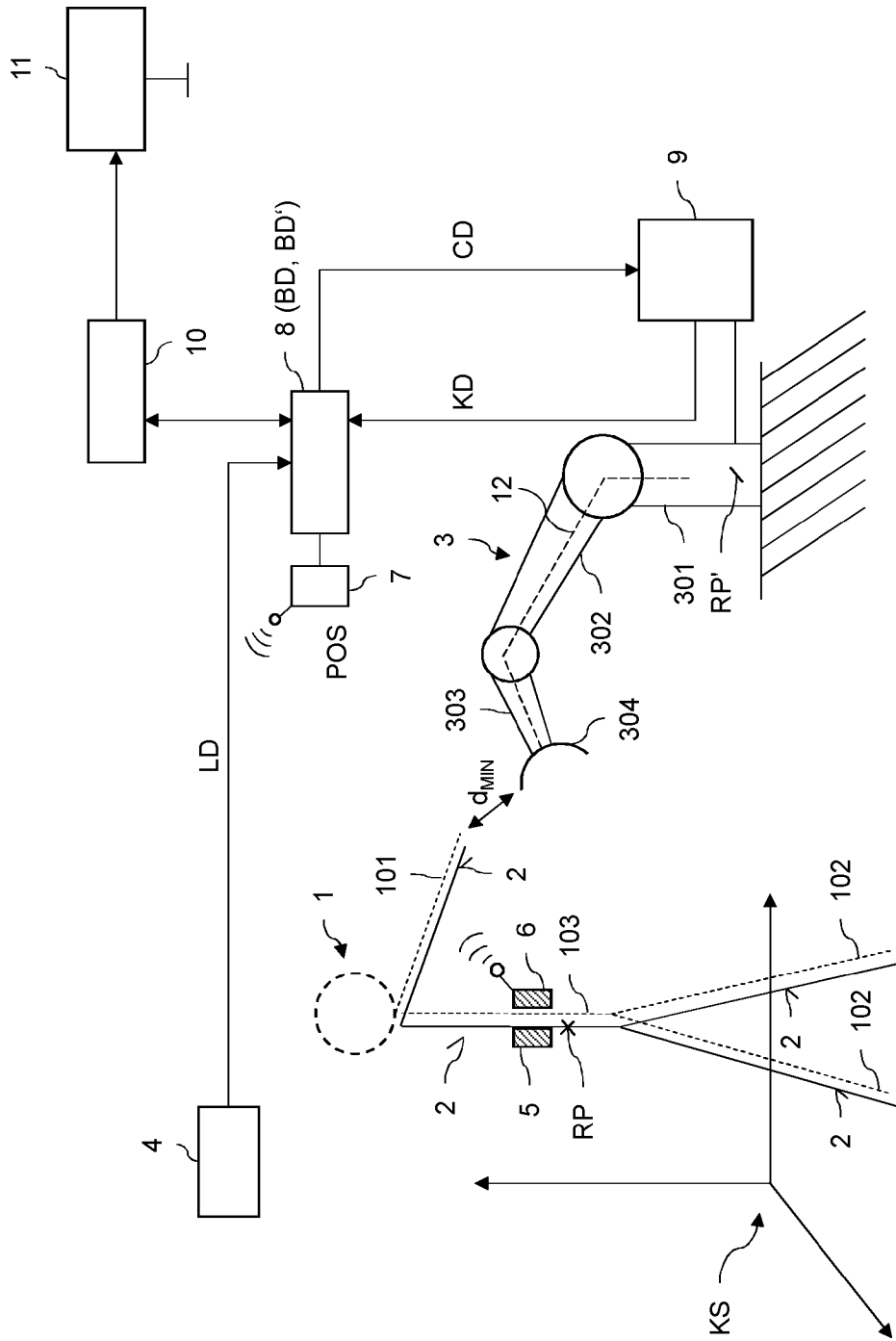


Fig. 1

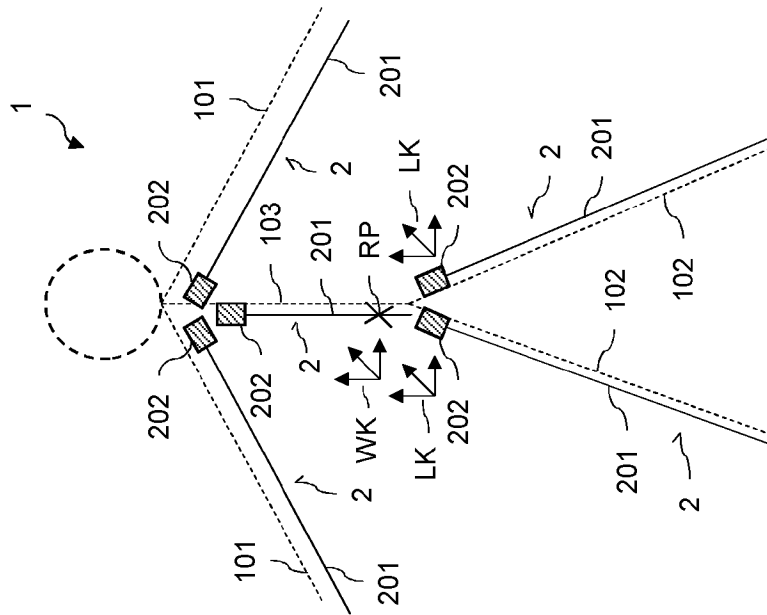


Fig. 2

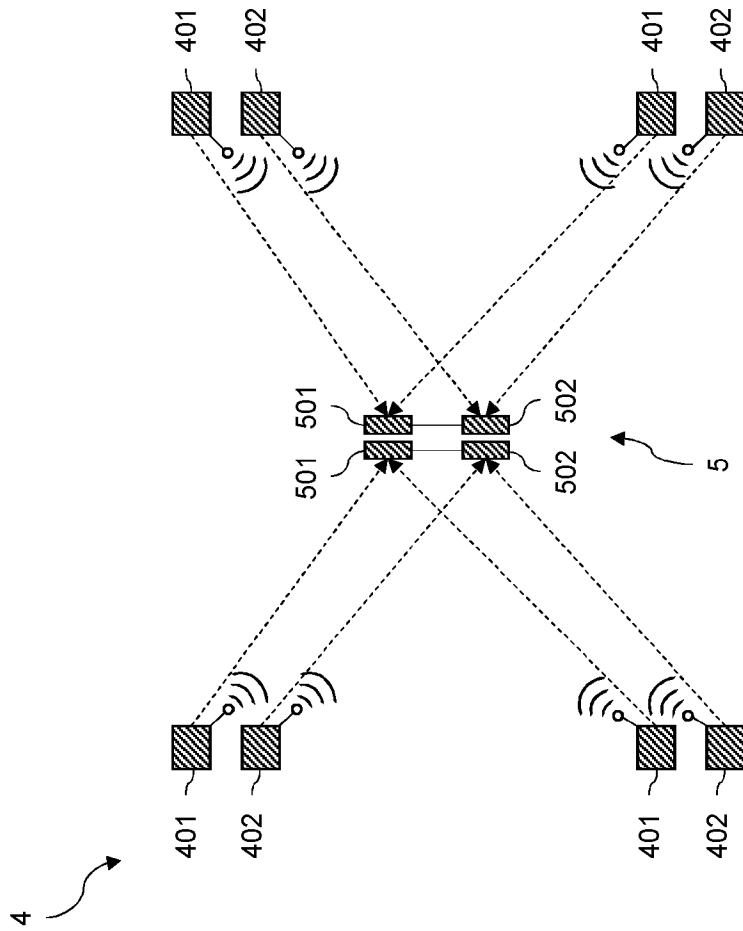


Fig. 3

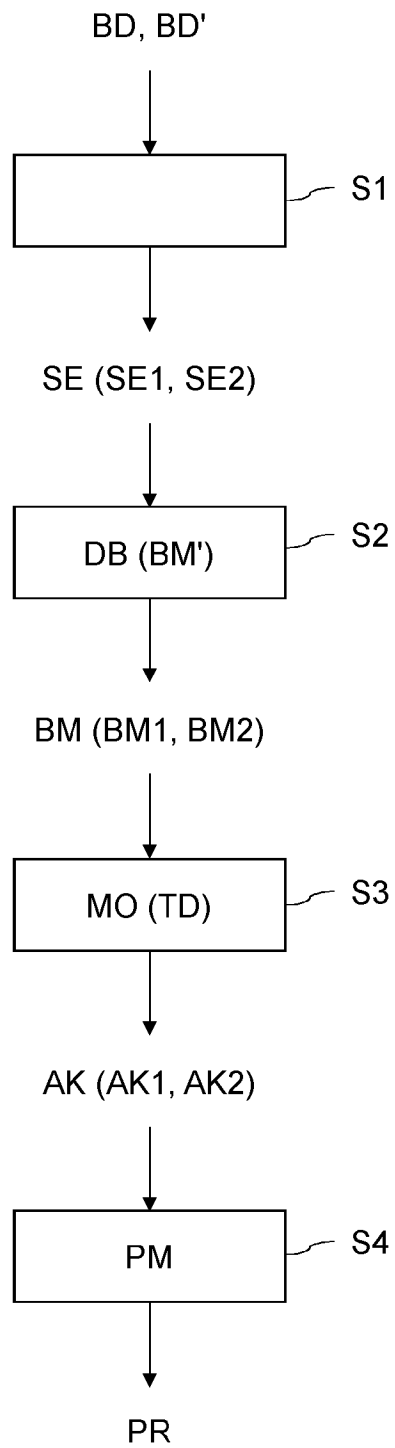


Fig. 4