

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

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
02. Januar 2020 (02.01.2020)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2020/002069 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:
B25J 9/16 (2006.01) G05B 13/02 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2019/066139

(22) Internationales Anmeldedatum:
19. Juni 2019 (19.06.2019)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
18180476.6 28. Juni 2018 (28.06.2018) EP

(71) Anmelder: SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT
[DE/DE]; Werner-von-Siemens-Straße 1, 80333 München (DE).

(72) Erfinder: BACHMAIER, Georg; Kohlstraße 2, 80469 München (DE). BISCHOFF, Martin; Kirchenstraße 4, 85653 Aying, Großhelfendorf (DE).

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

(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW,

(54) Title: METHOD AND DEVICE FOR ASCERTAINING CONTROL PARAMETERS IN A COMPUTER-ASSISTED MANNER FOR ADVANTAGEOUSLY HANDLING A TECHNICAL SYSTEM

(54) Bezeichnung: VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUM RECHNERGESTÜTZTEN ERMITTELN VON REGELPARAMETERN FÜR EINE GÜNSTIGE HANDLUNG EINES TECHNISCHEN SYSTEMS

FIG 3

FIG 3A

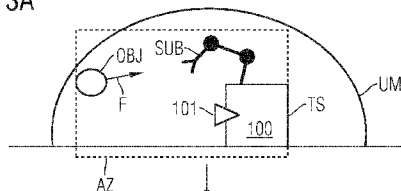


FIG 3B

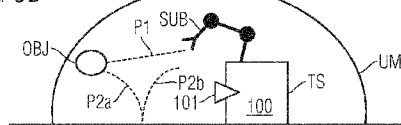
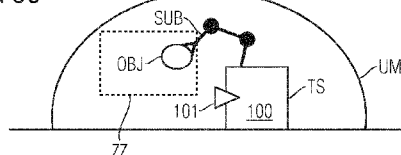


FIG 3C



(57) Abstract: The invention relates to a method and a device for ascertaining control parameters in a computer-assisted manner for advantageously handling a technical system, for example a technical subsystem of a technical system. A starting state (AZ) and the surroundings (UM) of the technical system (TS) are detected and a target state (ZZ) is read. A physical simulation model (SIM) of the technical system (TS) is selected, said model at least partly matching the surroundings (UM) and/or the starting state (AZ), and starting values of the physical simulation model (SIM) are adapted to the surroundings (UM) and/or the starting state (AZ). On the basis of the starting values, different combinations of handling steps of the technical system (TS) are simulated with respect to the target state (ZZ), wherein control parameters of the technical system (TS) for carrying out the handling steps are varied. The simulation data is used to train a machine learning routine by means of an evaluation of each handling step, and the trained machine learning routine is used to ascertain a combination of advantageous handling steps for the technical system (TS).

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zum rechnergestützten Ermitteln von Regelparametern für eine günstige Handlung eines technischen Systems, beispielsweise eines technischen Subsystems eines technischen Systems. Es wird ein Ausgangszustand (AZ) und eine Umgebung (UM) des technischen Systems (TS) erfasst und ein Zielzustand (ZZ) eingelesen. Es wird ein physikalisches Simulationsmodell (SIM) des technischen Systems (TS), das zumindest teilweise mit der Umgebung (UM) und/oder dem Ausgangszustand (AZ) übereinstimmt, selektiert und Ausgangswerte des physikalischen Simulationsmodells (SIM) an die Umgebung (UM) und/oder den Ausgangszustand (AZ) angepasst. Ausgehend von den Ausgangswerten und in Bezug auf den Zielzustand (ZZ), werden verschiedene Kombinationen aus

WO 2020/002069 A1

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

Veröffentlicht:

- mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)

Handlungsschritten des technischen Systems (TS) simuliert, wobei Regelparameter des technischen Systems (TS) zum Ausführen der Handlungsschritte variiert werden. Anhand der Simulationsdaten wird eine maschinelle Lernroutine mittels einer Bewertung eines jeweiligen Handlungsschrittes trainiert und anhand der trainierten maschinellen Lernroutine wird eine Kombination aus günstigen Handlungsschritten für das technische System (TS) ermittelt.

Beschreibung

Verfahren und Vorrichtung zum rechnergestützten Ermitteln von
Regelparametern für eine günstige Handlung eines technischen
5 Systems

Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zum
rechnergestützten Ermitteln von Regelparametern für eine
günstige Handlung eines technischen Systems, beispielsweise
10 eines Endeffektors eines autonomen Roboters.

Mittels autonomen technischen Systemen, wie z.B. autonomen
Robotern, können Objekte manipuliert werden. Als Beispiel ist
hier das Fangen eines Objektes, das sich auf einer Flugbahn
15 befindet, durch einen Endeffektor eines Roboters zu nennen.
Insbesondere sollen autonome technische Systeme schnell auf
eine Situation reagieren bzw. schnell eine bestmögliche Hand-
lung ausführen können.

20 Ein technisches System kann insbesondere aus Subsystemen, wie
z.B. einem Prozessor und einem Endeffektor, aufgebaut sein,
welche insbesondere als hierarchisch strukturierte Rechenein-
heiten aufgebaut und miteinander vernetzt sein können. So
können insbesondere Handlungen oder Handlungsschritte auf
25 verschiedenen Ebenen einer hierarchisch strukturierten Steue-
rung prozessiert und umgesetzt werden.

Herkömmliche Steuerungsverfahren basieren beispielsweise auf
dem Erkennen eines Objektes in der Umgebung des technischen
30 Systems durch Sensoren und dem Ermitteln eines geeigneten
Handlungsablaufs zur Manipulation des Objektes mittels Pfad-
planungsalgorithmen. So können herkömmliche Verfahren typi-
scherweise lediglich einen Ist-Zustand einer Umgebung eines
technischen Systems betrachten und nur schwer prognostizie-
35 ren, wie, aufgrund von physikalischen Gesetzmäßigkeiten, des-
sen Handlungen die Umgebung beeinflussen.

Es können beispielsweise sogenannte simultane Lokalisierung und Kartenerstellungsverfahren (englisch: „Simultaneous Localization and Mapping“), auch als SLAM-Verfahren bekannt, genutzt werden, wobei mittels Sensordaten die Umgebung eines autonomen technischen Systems erfasst oder geschätzt wird. 5 Insbesondere wird die Position und Ausrichtung des autonomen technischen Systems selbst und ggf. weiterer Objekte in der Umgebung erfasst. Mittels Pfadplanungsalgorithmen, welche typischerweise auf mathematischen und/oder numerischen Methoden basieren, kann ein zulässiger und günstiger Pfad bzw. Abfolge 10 von Handlungsschritten für das autonome technische System ermittelt werden. Solche Verfahren berücksichtigen aber in der Regel keine Konsequenzen einer Handlung des autonomen technischen Systems oder physikalischen Effekte.

15 Es ist daher eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, eine Möglichkeit zu schaffen, günstige Handlungsschritte für ein technisches System unter Berücksichtigung dessen Umgebung zu ermitteln.

20 Die Aufgabe wird gelöst durch ein Verfahren mit den Merkmalen des Patentanspruchs 1, einer Vorrichtung und ein Computerprogrammprodukt. Vorteilhafte Ausführungsformen und Weiterbildungen der Erfindung sind in den abhängigen Ansprüchen angegeben. 25

Ein erster Aspekt der Erfindung betrifft ein Verfahren zum rechnergestützten Ermitteln von Regelparametern für eine günstige Handlung eines technischen Systems, umfassend die 30 Verfahrensschritte:

- Erfassen eines Ausgangszustands und einer Umgebung des technischen Systems mittels mindestens eines Sensors,
- Ermitteln eines Zielzustandes für das technische System,
- Selektieren eines physikalischen Simulationsmodells des 35 technischen Systems und dessen Umgebung, das zumindest teilweise mit der Umgebung und/oder dem Ausgangszustand übereinstimmt,

- Anpassen von Ausgangswerten des physikalischen Simulationsmodells an die Umgebung und/oder den Ausgangszustand,
 - Simulieren verschiedener Kombinationen aus Handlungsschritten des technische Systems mittels des physikalischen Simulationsmodells, ausgehend von den Ausgangswerten und in Bezug auf den Zielzustand, wobei Regelparameter des technische Systems zum Ausführen der Handlungsschritte variiert werden, und Ausgeben von jeweiligen resultierenden Simulationsdaten,
 - Trainieren einer maschinellen Lernroutine anhand der jeweiligen resultierenden Simulationsdaten mittels einer Bewertung eines jeweiligen Handlungsschrittes,
 - Ermitteln einer optimierten Kombination aus Handlungsschritten anhand der trainierten maschinellen Lernroutine, wobei der optimierten Kombination aus Handlungsschritten eine günstige Bewertung zugeordnet ist,
- und
- Ausgeben der Regelparameter der optimierten Kombination aus Handlungsschritten zum Steuern des technischen Systems.

Es ist ein Vorteil der Erfindung, dass mittels einer rechnergestützten physikalischen Simulation in Kombination mit einer maschinellen Lernroutine auf schnelle und effiziente Weise eine optimierte Handlung bzw. ein optimierter Handlungsablauf bzw. Pfad für ein technisches System bestimmt werden kann, wobei insbesondere physikalische Effekte, wie z.B. Gravitation oder Kollision, und physikalische Größen berücksichtigt werden können. Insbesondere kann ein technisches System auch als ein technisches Subsystem eines technischen Systems verstanden werden. So kann insbesondere gemäß der Erfindung eine günstige Handlung auch für ein Subsystem des technischen Systems, wie z.B. ein Endeffektor eines Roboters, ermittelt werden. Beispielsweise kann die Komplexität der Berechnung der Simulation reduziert werden, indem ein Simulationsmodell des technischen Systems ausgewählt wird, dessen Konfiguration oder Ausgangswerte nahe am Ausgangszustand des technischen Systems oder des Subsystems des technischen Systems sind.

Mittels der maschinellen Lernroutine können günstige Handlungsschritte für das technische System oder für das technische Subsystem anhand der Simulationsdaten ermittelt werden, wobei die Handlungsschritte physikalische Effekte, wie z.B. Wechselwirkungen mit der Umgebung, nutzen. Damit kann eine schnelle und präzise Pfadplanung erreicht werden, die insbesondere Konsequenzen eines vorhergehenden Handlungsschrittes und/oder eines physikalischen Effektes berücksichtigt. So kann das technische System insbesondere physikalische Gesetze bei der Pfadplanung berücksichtigen, wie z.B. einen Parabelflug eines zu fangenden Objektes im Gravitationsfeld der Erde.

Insbesondere kann ein physikalisches Simulationsmodell bereitgestellt werden, das der realen durch einen Sensor erfassten Umgebung und der Ausgangssituation des technischen Systems zumindest teilweise entspricht. Das Simulationsmodell kann vorzugsweise ein Modell des gesamten oder eines Teils, wie z.B. eines Subsystems, des technischen Systems umfassen, so dass insbesondere eine Simulation eines Subsystems abhängig von Randbedingungen sein kann, die durch das Simulationsmodell des technischen Systems festgelegt sind. Es kann mittels einer rechnergestützten Simulation und anhand des Simulationsmodells mindestens ein Handlungsablauf des technischen Systems simuliert werden. Dadurch kann insbesondere eine schnelle Berechnung der Simulation erzielt werden. Das physikalische Simulationsmodell kann somit insbesondere anstatt eines herkömmlichen SLAM-Verfahrens genutzt werden. Eine Pfadplanung kann beispielsweise durch ein wiederholtes Durchführen der physikalischen Simulation mit unterschiedlichen Pfaden, d.h. beispielsweise unterschiedliche Ansteuerungsmöglichkeiten des technischen Systems mittels verschiedener Regelparameter, im Rahmen eines maschinellen Lernverfahrens erfolgen. Durch eine beispielsweise positive Bewertung der Pfade kann eine optimierte Pfadplanung erzielt werden, wobei physikalische Gesetze in die Planung mit einbezogen werden können. Dadurch ist die Bestimmung eines günstigen Handlungs-

ablaufs insbesondere flexibel, da die Abfolge der Handlungsschritte nicht starr vorgegeben ist.

Ein technisches System kann insbesondere ein autonomes technisches System, wie z.B. ein autonomer Roboter, sein. Ein Subsystem des technischen Systems kann insbesondere ein Endeffektor eines Roboters oder ein Aktor einer Maschine sein. Unter Ermittlung einer Kombination von Handlungsschritten kann insbesondere Planung einer Aktionssequenz oder eine Handlungsplanung oder eine Pfadplanung verstanden werden, wobei die einzelnen Handlungsschritte mittels Regelparametern gesteuert werden. Unter einem Handlungsschritt kann insbesondere eine Aktion oder eine Bewegung des technischen Systems oder eines Subsystems verstanden werden.

15

Unter einer maschinellen Lernroutine kann ein maschinelles Lernverfahren, wie z.B. ein neuronales Netz, verstanden werden. Insbesondere kann ein Verfahren zum überwachten Lernen, wie z.B. zum bestärkenden Lernen (englisch: „Reinforcement Learning“), genutzt werden. Die maschinelle Lernroutine wird ausgehend von einem durch mindestens einen Sensor ermittelten Ausgangszustand des technischen Systems und in Bezug auf einen vorgegebenen Zielzustand mittels Simulationsdaten trainiert. In anderen Worten, ein Zielzustand wird zum Trainieren der maschinelle Lernroutine vorgegeben und die maschinelle Lernroutine wird derart trainiert, dass sie ausgehend von einem Ausgangszustand eine Kombination von Handlungsschritten ermittelt, die zum Zielzustand führen. Der Zielzustand kann beispielsweise vorgegeben sein und/oder als Datensatz eingelesen werden. Es können verschiedene Kombinationen von Handlungsschritten ausgehend vom Ausgangszustand zum Zielzustand führen, wobei manche der verschiedenen Kombinationen günstiger sein können. Die verschiedenen Handlungsschritte können mittels des Simulationsmodells rechnergestützt simuliert werden und jeweils Simulationsdaten ausgegeben werden. Die Simulationsdaten können insbesondere Werte der Regelparameter, Zustände, Aktionen und Reaktionen des technischen Systems und

30
35

physikalische Effekte und Größen des technischen Systems und dessen Umgebung umfassen.

Jeder Handlungsschritt und/oder dessen Auswirkung kann bewert
5 tet werden oder jedem Handlungsschritt kann jeweils eine Bewertung zugeordnet sein. Die maschinelle Lernroutine kann insbesondere anhand der Bewertungen, wie z.B. Wertzahlen, die jeweils einem Handlungsschritt zugeordnet werden, trainiert werden, wie z.B. mittels einer Belohnungsfunktion (englisch:
10 „reward function“). Insbesondere können günstige Handlungsschritte bevorzugt werden, wobei unter dem Begriff „günstig“ in Zusammenhang mit der Erfindung beispielsweise vorteilhaft, brauchbar, geeignet, sinnvoll, effizient, energieeffizient, schnell, auf kurzem Weg oder ähnliches verstanden werden
15 kann. Die Ermittlung einer Kombination aus günstigen Handlungsschritten kann beispielsweise durch einen Vergleich der Gesamtbewertung der verschiedenen Kombinationen aus Handlungsschritten erfolgen, wobei diejenige Kombination mit einer günstigen Gesamtbewertung selektiert werden kann.

20

In einer vorteilhaften Ausführungsform des Verfahrens kann mindestens ein physikalisches Simulationsmodell des technischen Systems und dessen Umgebung generiert und gespeichert und anschließend zur Selektion bereitgestellt werden.

25

Vorzugsweise kann mindestens ein physikalisches Simulationsmodell des technischen Systems und dessen Umgebung vorab generiert und beispielsweise in einer Datenbank gespeichert werden. Beispielsweise kann eine Vielzahl an Simulationsmodellen bereitgestellt werden und, abhängig vom erfassten Ausgangszustand und/oder der Umgebung des technischen Systems und/oder eines Subsystems des technischen Systems, ein möglichst ähnliches Simulationsmodell selektiert werden.
30

35 In einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform des Verfahrens kann die maschinelle Lernroutine trainiert werden, sobald Simulationsdaten von mindestens einer Kombination aus Handlungsschritten verfügbar sind.

Es kann von Vorteil sein, die computergestützte Simulation des technischen Systems oder eines Teils der technischen Systems sowie das Training der maschinellen Lernroutine parallel durchzuführen. Beispielsweise kann eine parallele Berechnung auf mehr als einer Recheneinheit, wie z.B. auf mehreren Grafikprozessoren, durchgeführt werden. Damit kann beispielsweise eine schnelle und effiziente Ermittlung einer günstigen Kombination aus Handlungsschritten erzielt werden.

10

In einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform des Verfahrens kann die Bewertung eines Handlungsschrittes abhängig von einem Ergebnis eines Handlungsschritts in Bezug auf den Zielzustand ausgeführt werden.

15

Ein Handlungsschritt des Subsystems, wie z.B. eine Aktion eines Endeffektors, kann abhängig vom Ergebnis, oder auch einer Auswirkung der jeweiligen Aktion bewertet werden. Insbesondere kann die Bewertung dem Handlungsschritt zugeordnet werden. Eine Bewertung kann insbesondere abhängig vom oder in Bezug auf den vorgegebenen Zielzustand erfolgen.

20

In einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform des Verfahrens kann der Zielzustand abhängig vom erfassten Anfangszustand und/oder von der erfassten Umgebung des technischen Systems ermittelt werden.

25

Vorzugsweise kann mittels eines Sensors ein Anfangszustand ermittelt und ausgehend von diesem Anfangszustand ein Zielzustand bestimmt werden. Dies kann insbesondere eine schnelle Aktion oder Reaktion des technischen Systems oder eines Subsystems ermöglichen. Beispielsweise kann ein Zielzustand einem Anfangszustand zugeordnet sein oder ein Zielzustand kann aus einer Menge an vorgegebenen Zielzuständen selektiert werden. Als Beispiel kann die Detektion eines Objekts mittels einer Kamera genannt werden, wobei abhängig von der Detektion der Zielzustand vorgegeben wird.

30

35

In einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform des Verfahrens kann das physikalische Simulationsmodell abhängig vom Ausgangszustand und/oder vom Zielzustand und/oder von der Umgebung und/oder von einer Art des technischen Systems konstruiert werden.

Vorzugsweise kann die Komplexität und/oder die Dimension des physikalischen Simulationsmodells und der rechnergestützten Simulation abhängig vom Ausgangszustand und/oder vom Zielzustand und/oder von der Umgebung und/oder von der Art des technischen Systems und/oder eines technischen Subsystems gewählt werden.

In einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform des Verfahrens können physikalische Eigenschaften eines Objektes in der Umgebung des technischen Systems als Parameterdaten erfasst, in einer Speichereinheit gespeichert und im physikalischen Simulationsmodell integriert werden.

Zusätzlich zur Objekterkennung durch einen Sensor können zusätzlich physikalische Eigenschaften oder Parameter eines Objektes in z.B. einer Datenbank gespeichert sein und von dort abgefragt werden. Beispielsweise können physikalische Größen, wie z.B. Gewicht oder Materialeigenschaften, eines Objekts vorab erfasst und in einer Speichereinheit, wie z.B. einer Datenbank, gespeichert werden. Die physikalischen Eigenschaften können insbesondere als Parameterdaten, oder auch als Eingabedaten, für das Simulationsmodell genutzt werden. Somit können beispielsweise physikalische Effekte, wie z.B. die Beschleunigung eines fallenden Objektes im Gravitationsfeld der Erde, detailliert simuliert werden.

In einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform des Verfahrens kann die Simulation des technischen Systems und das Training der maschinellen Lernroutine für mehr als einen Zielzustand und/oder für mehr als einen Ausgangszustand des technischen Systems durchgeführt werden und jeweils eine optimierte Kombination aus Handlungsschritten für das techni-

sche System mit einer günstigen Bewertung ermittelt und in einer Speichereinheit gespeichert wird.

5 Beispielsweise kann mehr als eine maschinelle Lernroutine
mittels Simulationsdaten zu verschiedenen Ausgangszuständen
und in Bezug auf verschiedene Zielzustände trainiert werden
und jeweils eine Kombination aus Handlungsschritten, der eine
günstige Bewertung zugeordnet ist, in einer Speichereinheit
10 gespeichert werden. Somit kann vorzugsweise für verschiedene
Zustände eines technischen Subsystems des technischen Systems
eine entsprechende trainierte maschinelle Lernroutine abge-
speichert werden, so dass auf diese schnell zugegriffen wer-
den kann, wenn z.B. ein entsprechender Ausgangszustand des
15 technischen Systems detektiert und/oder ein bestimmter Ziel-
zustand vorgegeben wird. Es ist auch möglich, ähnliche Aktio-
nen zu simulieren, eine entsprechende maschinelle Lernroutine
zu trainieren und diese für künftige Trainings zu nutzen, so
dass die Berechnungszeit verkürzt werden kann. Eine Speicher-
20 einheit kann insbesondere eine Datenbank sein. Es können so-
mit verschiedene Handlungsschritte für verschiedene Situatio-
nen simuliert und daraus Reflexe gelernt werden. Die Trai-
ningszeit während einer realen Situation kann somit verkürzt
werden.

25 In einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform des Verfah-
rens können Regelparameter für eine optimierte Kombination
aus Handlungsschritten mit einer günstigen Bewertung in Ab-
hängigkeit eines Zielzustandes in einer Speichereinheit ge-
speichert werden.

30 Vorzugsweise kann anhand einer trainierten maschinellen Lern-
routine eine Kombination aus Handlungsschritten, der eine
günstige Bewertung zugeordnet ist, ermittelt werden und die
entsprechenden Regelparameter für das Subsystem, die diese
35 Handlungsschritte regeln, können in einer Datenbank abgelegt
werden. So können diese beispielsweise für eine künftige Ak-
tion mit einem gleichen oder zumindest ähnlichen Ausgangs-
und Zielzustand abgefragt und ausgeführt werden.

In einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform des Verfahrens können verschiedene Kombinationen aus Handlungsschritten des technischen Systems zeitlich parallel auf mehr als einer
5 Recheneinheit simuliert werden.

Vorzugsweise kann die rechnergestützte Simulation und/oder das Trainieren einer maschinellen Lernroutine parallel, wie z.B. auf Grafikprozessoren (englisch: „graphics processing
10 units“, kurz GPUs), durchgeführt werden. Damit kann insbesondere eine schnelle und effiziente Berechnung einer Kombination aus günstigen Handlungsschritten erfolgen.

In einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform des Verfahrens können die Umgebung und/oder der Ausgangszustand des
15 technischen Systems fortlaufend mittels mindestens eines Sensors erfasst werden und das physikalische Simulationsmodell kann mittels der Sensordaten fortlaufend angepasst werden.

Vorzugsweise werden ein aktueller Ausgangszustand und die Umgebung des technischen Systems kontinuierlich oder zu vorgegebenen Zeitpunkten mittels eines Sensors überwacht, so dass
20 das physikalische Simulationsmodell entsprechend angepasst werden kann.

In einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform des Verfahrens können die Regelparameter an das technische System übertragen werden und die optimierte Kombination aus Handlungs-
25 schritten kann durch das technische System ausgeführt werden.

Die Regelparameter können zum Steuern des technischen Systems und/oder eines Subsystems des technischen Systems übertragen werden, so dass die Kombination aus Handlungsschritten von diesem ausgeführt werden kann. Vorzugsweise können lediglich
30 Regelparameter zum Steuern für eine Kombination aus Handlungsschritten, der eine günstige Bewertung zugeordnet ist, an das übertragen werden.

In einer vorteilhaften Ausführungsform des Verfahrens kann ein Ergebnis der ausgeführten optimierten Kombination aus Handlungsschritten bewertet werden und diese Bewertung kann zum Trainieren der maschinellen Lernroutine bereitgestellt werden.

Basierend auf dem Ergebnis der Ausführung einer Handlung kann die maschinelle Lernroutine aktualisiert werden, indem das Ergebnis der Handlung bewertet und die Bewertung als gelerntes Wissen abgespeichert wird. Es kann beispielsweise eine Gesamtbewertung der Handlung oder des Zielzustandes oder eine Summe der Bewertung einzelner Handlungsschritte genutzt werden.

Ein weiterer Aspekt der Erfindung betrifft eine Vorrichtung zum rechnergestützten Ermitteln von Regelparametern für eine günstige Handlung eines technischen Systems, umfassend:

- mindestens einen Sensor, der derart eingerichtet ist, einen Ausgangszustand und einer Umgebung des technischen Systems zu erfassen,
- ein Zielmodul, das derart eingerichtet ist, einen Zielzustand für das technische System zu ermitteln,
- eine Modellierungsmodul, das derart eingerichtet ist, ein physikalisches Simulationsmodell des technischen Systems und dessen Umgebung zu selektieren, das zumindest teilweise mit der Umgebung und/oder dem Ausgangszustand übereinstimmt, und Ausgangswerte des physikalischen Simulationsmodells an die Umgebung und/oder den Ausgangszustand des Subsystems anzupassen,
- ein Simulationsmodul, das derart eingerichtet ist, verschiedene Kombinationen aus Handlungsschritten des technischen Systems mittels des physikalischen Simulationsmodells, ausgehend von den Ausgangswerten und in Bezug auf den Zielzustand, zu simulieren, wobei Regelparameter des technischen Systems zum Ausführen der Handlungsschritte variiert werden, und jeweilige resultierende Simulationsdaten auszugeben,
- ein Trainingsmodul, das derart eingerichtet ist, eine maschinelle Lernroutine anhand der jeweiligen resultierenden

Simulationsdaten mittels einer Bewertung eines jeweiligen Handlungsschrittes zu trainieren,

- ein Optimierungsmodul, das derart eingerichtet ist, eine optimierte Kombination aus Handlungsschritten anhand der trainierten maschinellen Lernroutine zu ermitteln, wobei der optimierten Kombination aus Handlungsschritten eine günstige Bewertung zugeordnet ist,

und

- ein Ausgabemodul, das derart eingerichtet ist, die Regelparameter der optimierten Kombination aus Handlungsschritten zum Steuern des technischen Systems auszugeben.

Die Vorrichtung kann insbesondere mit dem technischen System und/oder mit einem technischen Subsystem des technischen Systems gekoppelt oder darin integriert sein.

In einer vorteilhaften Ausführungsform umfasst die Vorrichtung ein Übertragungsmodul zum Übertragen der Regelparameter an das technische System.

In einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform umfasst die Vorrichtung mindestens eine Speichereinheit und/oder mindestens eine Recheneinheit.

Eine Speichereinheit kann beispielsweise eine Datenbank sein. Eine Recheneinheit kann insbesondere ein Prozessor oder ein Grafikprozessor sein.

Des Weiteren umfasst die Erfindung ein Computerprogrammprodukt, das direkt in einen programmierbaren Computer ladbar ist, umfassend Programmcodeteile, die dazu geeignet sind, die Schritte des erfindungsgemäßen Verfahrens durchzuführen.

Ausführungsbeispiele des erfindungsgemäßen Verfahrens und der erfindungsgemäßen Vorrichtung sind in den Zeichnungen beispielhaft dargestellt und werden anhand der nachfolgenden Beschreibung näher erläutert. Es zeigen in schematischer Darstellung:

- Fig. 1 ein Ablaufdiagramm eines erfindungsgemäßen Verfahrens zum rechnergestützten Ermitteln von Regelparametern für eine günstige Handlung eines technischen Systems;
- 5
- Fig. 2 eine schematische Darstellung eines erfindungsgemäßen Verfahrens zum rechnergestützten Ermitteln von Regelparametern für eine günstige Handlung eines technischen Systems; und
- 10
- Fig. 3 eine schematische Darstellung einer erfindungsgemäßen Vorrichtung zum rechnergestützten Ermitteln von Regelparametern für eine günstige Handlung eines technischen Systems.
- 15

Einander entsprechende Gegenstände sind in allen Figuren mit den gleichen Bezugszeichen versehen.

20 Figur 1 zeigt ein Ablaufdiagramm eines erfindungsgemäßen Verfahrens zum rechnergestützten Ermitteln von Regelparametern für eine günstige Handlung eines technischen Systems, insbesondere eines Subsystems eines technischen Systems, umfassend die folgenden Verfahrensschritte.

25

Ein technisches System kann im Folgenden insbesondere ein autonomes technisches System, wie z.B. ein autonomer Roboter in einer Industrieumgebung sein. Das technische System kann einzelne Handlungsschritte einer Handlung mittels eines Subsystems, z.B. eines Endeffektors, ausführen, um, ausgehend von einer Ausgangssituation, einen vorgegebenen Zielzustand zu erreichen. Die Handlungsschritte werden mittels Regelparametern vorgegeben, d.h. das technische System wird mittels der Regelparameter gesteuert.

30

35

Im Schritt 1 werden mittels mindestens eines Sensors, der dem technischen System zugeordnet oder mit diesem gekoppelt oder in diesem integriert ist, die Umgebung und der Ausgangszu-

stand des technischen Systems erfasst. Beispielsweise kann das technische System ein Roboter mit mindestens einem Endeffektor sein, wobei die aktuelle Position, Ausrichtung und Umgebung des Endeffektors und/oder des technischen System als Ganzes mittels einer Kamera erfasst wird. Die Kamera kann
5 beispielsweise an dem Roboter montiert oder auf diesen gerichtet sein.

Die Umgebung kann beispielsweise die direkte Umgebung in einem vorgegebenen Aktionsradius des technischen Systems sein. Eigenschaften und/oder Zustandsgrößen der Umgebung können insbesondere dort befindliche Objekte oder physikalische Größen wie Raumhöhe oder Temperatur sein.
10

Im Schritt 2 des Verfahrens wird ein Zielzustand für das technische System, wobei der Zielzustand beispielsweise als ein Parameterdatensatz oder ein Vektor vorliegen und insbesondere den Ergebniszustand einer Handlung beschreiben kann. Der Zielzustand kann vorgegeben sein oder anhand der erfassten Ausgangssituation ermittelt werden. Ein Zielzustand kann
20 beispielsweise angeben, dass ein Objekt vom Endeffektor gegriffen werden soll, wobei ein Ausgangszustand beispielsweise das Objekt in der Umgebung des technischen Systems umfasst.

Im Schritt 3 wird ein physikalisches Simulationsmodell für das technische System und das Subsystem selektiert. Vorzugsweise sind in einer Speichereinheit eine Vielzahl an physikalischen Simulationsmodellen für das technische System in verschiedenen Zuständen und/oder verschiedenen Umgebungen bereitgestellt. Es wird vorzugsweise ein physikalisches Simulationsmodell ausgewählt, das zumindest teilweise mit der Umgebung und/oder dem Ausgangszustand des technischen Systems übereinstimmt. Beispielsweise kann ein Simulationsmodell selektiert werden, welches das technische System in einem ähnlichen Betriebszustand und/oder in einer ähnlichen Betriebs-
30 umgebung modelliert, wobei das technische System beispielsweise eine zumindest ähnliche Ausrichtung aufweist wie das modellierte technische System im Simulationsmodell.
35

Im Schritt 4 werden die Ausgangswerte des physikalischen Simulationsmodells mittels der Sensordaten des Ausgangszustands und/oder der Umgebung des technischen Systems derart angepasst, dass eine Simulation des technischen Systems durchgeführt werden kann. Es kann insbesondere lediglich ein Subsystem des technischen Systems modelliert werden.

Die Komplexität und/oder die Domäne und/oder Dimension des physikalischen Simulationsmodells kann abhängig vom Zielzustand und/oder von der Umgebung und/oder von der Art des technischen Systems gewählt werden. Beispielsweise ist es denkbar, dass eine Simulation der Starrkörpermechanik eingesetzt wird, um das Greifen eines festen Gegenstandes durch einen Roboter zu simulieren. Je nach Einsatzgebiet des technischen Systems kann die Simulation aus anderen physikalischen Domänen aufgesetzt sein. Beispielsweise kann ein autonomes technisches System einen chemischen, hydrodynamischen oder finanzwirtschaftlichen Prozess durchführen, so dass eine entsprechende domänenspezifische Simulation konstruiert werden kann, um die Auswirkungen der Aktionen des technischen Systems zu prognostizieren.

Es können des Weiteren physikalische Eigenschaften von Objekten in der Umgebung, die z.B. als Parameterdaten in einer Datenbank gespeichert sind, eingelesen werden und im Simulationsmodell berücksichtigt werden. Beispielsweise kann mittels eines Sensors die Größe eines durch den Endeffektor zu greifenden Objektes erfasst werden. Dazu kann anhand einer Sammlung von physikalischen Eigenschaften des Objektes beispielsweise die Beschaffenheit der Oberfläche oder das Gewicht des Objektes ermittelt und zusätzlich in die Simulation integriert werden.

Ausgehend von dem selektierten und angepassten physikalischen Simulationsmodell wird in Schritt 5 eine Simulation, z.B. eine dynamische Simulation, des technischen Systems durchgeführt. Das technische System wird insbesondere ausgehend vom

erfassten Ausgangszustand und in Bezug auf den vorgegebenen Zielzustand simuliert. Dazu werden die Daten des Ausgangszustands, der Umgebung und des Zielzustands eingelesen. Insbesondere wird mindestens eine Kombination aus Handlungsschritten des technischen Systems simuliert, wobei die Simulation ausgehend vom Ausgangszustand startet und die Handlungsschritte derart gewählt werden, dass der vorgegebene Zielzustand vom technischen System erreicht wird. Um verschiedene Handlungsschritte zu simulieren, werden Regelparameter zum Steuern des technischen Systems variiert. Insbesondere können lediglich Handlungsschritte eines Subsystems des technischen Systems simuliert werden.

Es ist auch möglich, dass verschiedene Kombinationen aus Handlungsschritten, ausgehend von einem Ausgangszustand, den Zielzustand erreichen können. Beispielsweise kann ein autonomer Roboter einen beweglichen Roboterarm um verschiedene Achsen drehen und damit auf verschiedenen Pfaden eine Zielposition erreichen. Vorzugsweise werden die verschiedenen Kombinationen aus Handlungsschritten mittels der physikalischen Simulation simuliert, wobei Regelparameter zum Steuern der verschiedenen Handlungsschritte entsprechend variiert werden. Anschließend werden die Simulationsdaten der jeweiligen Kombination aus Handlungsschritten ausgegeben. Die Simulationsdaten können als Trainingsdaten zum Trainieren eines maschinellen Lernverfahrens genutzt werden.

Die Simulationsdaten können insbesondere auch Informationen über die Wechselwirkung mit der Umgebung beinhalten. Beispielsweise kann es beim Fangen eines Objektes von einem Roboter sinnvoll sein, das Objekt zunächst an einer Wand abprallen zu lassen, bevor es aufgefangen und gegriffen wird. Die Wechselwirkung mit einer Wand, d.h. der Umgebung, und die daraus resultierenden Handlungsschritte können mittels der physikalischen Simulation berechnet werden.

Im Schritt 6 wird eine maschinelle Lernroutine anhand der jeweiligen resultierenden Simulationsdaten trainiert. Eine

Lernroutine kann beispielsweise ein Neuronales Netz sein, welches mittels Reinforcement Learning trainiert wird. Das Training kann mittels einer Bewertung eines jeweiligen Handlungsschrittes erfolgen. Beispielsweise kann ein Handlungsschritt abhängig von einem Ergebnis eines Handlungsschrittes und/oder in Bezug auf den Zielzustand bewertet werden. Eine Bewertung kann insbesondere angeben, ob ein Handlungsschritt günstig ist. Beispielsweise kann die Bewertung eine Pfadlänge eines Handlungsschrittes bewerten und entsprechend einen Wert dem Handlungsschritt zuordnen. Anhand der Bewertung jeweiliger Handlungsschritte kann verglichen werden, welcher Handlungsschritt günstiger ist.

Die maschinelle Lernroutine kann insbesondere trainiert werden, sobald Simulationsdaten einer ersten Kombination aus Handlungsschritten berechnet vorliegen. Die Simulation und das Training der maschinellen Lernroutine können vorzugsweise nahezu parallel berechnet werden.

Im Schritt 7 wird eine optimierte Kombination aus günstigen Handlungsschritten, d.h. eine insgesamt günstige Handlung, anhand der trainierten maschinellen Lernroutine ermittelt, wobei unter „optimiert“ auch „nahe an einem Optimum“ verstanden werden kann. Den günstigen Handlungsschritten ist jeweils eine günstige Bewertung zugeordnet und/oder die Kombination aus günstigen Handlungsschritten weist eine günstige Gesamtbewertung auf. In anderen Worten, es kann anhand der trainierten maschinellen Lernroutine eine Abfolge aus Handlungsschritten ermittelt werden, die beispielsweise besonders effizient oder schnell ist. Die Ermittlung kann beispielsweise anhand eines Vergleichs der Gesamtbewertung einer Kombination aus Handlungsschritten mit den Gesamtbewertungen anderer Kombination aus Handlungsschritten erfolgen.

Im Schritt 8 werden, abhängig von der optimierten Kombination von günstigen Handlungsschritten, die entsprechenden Regelparameter zum Steuern des technischen Systems ausgegeben.

Optional können die Regelparameter im Schritt 9 an das technische System übertragen werden. Beispielsweise kann eine erfindungsgemäße Vorrichtung, wie beispielhaft in Figur 2 gezeigt, nahe am Endeffektor eines Roboters installiert sein und auf einem kurzen Kommunikationsweg die Regelparameter an diesen übertragen. Im Schritt 10 kann das technische System die Kombination aus Handlungsschritten entsprechend durchführen.

10 Vorzugsweise kann die Berechnung der Simulation und das Training der maschinellen Lernroutine in wenigen Millisekunden oder kürzer durchgeführt werden, so dass eine schnelle Aktion oder Reaktion, ähnlich zu einem Reflex, des Subsystems möglich ist.

15 Das Ergebnis der ausgeführten Kombination aus Handlungsschritten ist vorzugsweise der vorgegebene Zielzustand. Um die Durchführung der Handlung beispielsweise weiter zu optimieren, kann das Ergebnis der ausgeführten Handlung bewertet werden. Diese Bewertung kann beispielsweise zum Trainieren der maschinellen Lernroutine genutzt werden, siehe Schritt 20 11. Vorzugsweise kann damit in einer darauffolgenden Iteration die Rechenzeit verkürzt und die Genauigkeit der Pfadplanung erhöht werden.

25 In Figur 2 ist schematisch eine erfindungsgemäße Vorrichtung 100 in Blockdarstellung gezeigt. Die Vorrichtung 100 kann beispielsweise in einem technischen System und/oder Subsystem des technischen Systems integriert oder mit diesem über eine Kommunikationsverbindung C gekoppelt sein. Vorzugsweise ist die Kommunikationsverbindung möglichst kurz ausgestaltet, um eine schnelle Übertragung der ermittelten Regelparameter für eine günstige Handlung an z.B. ein Subsystem zu ermöglichen. Insbesondere können die einzelnen Einheiten und/oder Module einer erfindungsgemäßen Vorrichtung 100 einzeln in verschiedenen Systemen verbaut und miteinander gekoppelt sein, wie 30 35 z.B. mehrere Sensoren, die in der Umgebung des technischen

Systems TS installiert und mit der den anderen Einheiten kommunizieren.

Die Vorrichtung 100 umfasst mindestens einen Sensor 101
5 und/oder ist mit mindestens einem Sensor des technischen Systems und/oder Subsystems gekoppelt. Des Weiteren umfasst die Vorrichtung 100 ein Zielmodul 102, ein Modellierungsmodul 103, ein Simulationsmodul 104, ein Trainingsmodul 105, ein Optimierungsmodul 106 zum Ermitteln einer optimierten Kombi-
10 nation aus Handlungsschritten anhand der trainierten maschinellen Lernroutine, ein Ausgabemodul 107, ein Übertragungsmodul 108, mindestens eine Speichereinheit 109 und mindestens Recheneinheit 110. Vorzugsweise sind die Module und Einheiten zumindest teilweise miteinander gekoppelt und können über
15 Kommunikationsverbindungen Daten austauschen.

Mittels des Zielmoduls 102 wird ein Zielzustand für das Subsystem eingelesen. Der Zielzustand soll durch eine Kombination aus Handlungsschritten ausgehend von einem Ausgangszustand
20 und abhängig von der Umgebung des Subsystems erreicht werden. Die Steuerung des Subsystems erfolgt über Regelparameter, wobei mindestens ein Regelparameter einen Handlungsschritt definiert.

25 Das Modellierungsmodul 103 ist derart ausgestaltet, dass ein physikalisches Simulationsmodell SIM des technischen Systems, das beispielsweise vorab erstellt wurde und auf einer Speichereinheit gespeichert ist, abgefragt und an die Umgebung und/oder den Ausgangszustand des realen technischen Systems
30 angepasst werden kann. Das physikalische Simulationsmodell SIM des technischen Systems, das aus einer Vielzahl an physikalischen Simulationsmodellen selektiert wird, stimmt vorzugsweise zumindest teilweise mit dem Ausgangszustand und/oder der Umgebung des technischen Systems überein. Es
35 kann somit ein Simulationsmodell des gesamten technischen Systems genutzt werden und lediglich Teile bzw. Ausgangswerte an den Zustand und/oder Beschaffenheit eines technischen Subsystems des technischen Systems angepasst werden. Dies ermög-

licht insbesondere, dass die Berechnung der Simulation und das darauffolgende Training der maschinellen Lernroutine nahezu in Echtzeit durchgeführt werden kann.

5 Im Simulationsmodul 104 wird anhand des Simulationsmodells SIM verschiedene Kombinationen aus Handlungsschritten, ausgehend vom Ausgangszustand und in Bezug auf den Zielzustand, simuliert. Es können beispielsweise auch mehrere Simulationen parallel auf mehr als einer Recheneinheit 110 durchgeführt
10 werden. Es ist auch möglich, für verschiedene Ausgangszustände und/oder verschiedene Zielzustände jeweils mindestens eine Simulation durchzuführen und die jeweiligen Simulationsdaten auszugeben und/oder auf einer Speichereinheit 109 zu speichern.

15

Im Trainingsmodul 105 wird anhand der Simulationsdaten als Trainingsdaten eine maschinelle Lernroutine derart trainiert, günstige Kombinationen von Handlungsschritten für das technische System zu ermitteln. Dazu werden die einzelnen simulierten Handlungsschritte einer Kombination aus Handlungsschritten bewertet, wie z.B. abhängig vom jeweiligen Ergebnis eines Handlungsschrittes. Daraus ergibt sich eine mittels der Simulationsdaten trainierte maschinelle Lernroutine, die eine Kombination aus Handlungsschritten mit einer günstigen Bewertung ausgeben kann. Das Trainingsmodul 105 kann die trainierte maschinelle Lernroutine an das Optimierungsmodul 106 ausgeben. Das Ermitteln einer günstigen oder optimierten Kombination aus Handlungsschritten erfolgt im Optimierungsmodul 106 mittels der trainierten maschinellen Lernroutine. In anderen Worten, im Optimierungsmodul 106 wird die trainierte maschinelle Lernmethode angewandt, um eine optimierte Kombination aus günstigen Handlungsschritten zu ermitteln.

Durch das Ausgabemodul 107 werden die Regelparameter zum
35 Steuern der selektierten optimierten Kombination aus Handlungsschritten an das technische System ausgegeben und durch das Übertragungsmodul 108 an dieses zum Ausführen der Handlungsschritte übertragen.

In der Speichereinheit 109 können Simulationsdaten und/oder Regelparameter gespeichert werden. Beispielsweise können für verschiedene Ausgangszustände und/oder Zielzustände verschiedene Simulationen durchgeführt werden. Ausgehend von diesen
5 verschiedenen Simulationsdaten kann mindestens eine maschinelle Lernroutine gemäß der Erfindung trainiert und anhand der trainierten maschinellen Lernroutine können günstige Kombinationen aus Handlungsschritten ermittelt werden.

10

Die mindestens eine Recheneinheit 110 kann beispielsweise ein Prozessor oder ein Grafikprozessor sein, auf dem beispielsweise ein erfindungsgemäßes Computerprogrammprodukt Schritte eines erfindungsgemäßen Verfahrens durchführen kann. Insbesondere kann mehr als eine Recheneinheit (nicht dargestellt)
15 für eine parallele Simulation und/oder Training der maschinellen Lernroutine genutzt werden.

20

Die Vorrichtung 100 kann insbesondere dazu genutzt werden, ein autonomes technisches System auf schnelle, reflexartige Weise zu steuern, wobei günstige Handlungsschritte zum Erreichen eines vorgegebenen Zielzustandes mittels einer maschinellen Lernroutine und einer physikalischen Simulation in kurzer Zeit ermittelt werden können.

25

Figur 3 zeigt schematisch ein Ausführungsbeispiel eines erfindungsgemäßen Verfahrens, wobei die Figur 3 in Figur 3A bis 3C unterteilt ist, welche den Ablauf des Verfahrens beschreiben. Als technisches System TS ist ein autonomer Roboter mit einem technischen Subsystem SUB, z.B. einem Endeffektor, dargestellt. Der Endeffektor SUB, z.B. eine Greifvorrichtung, des autonomen Roboters TS kann mittels einer erfindungsgemäßen Vorrichtung 100 derart gesteuert werden, dass er auf schnelle Weise eine Kombination aus günstigen Handlungsschritten durchführen kann. Die Vorrichtung 100 kann beispielsweise dem technischen System TS oder dem Subsystem SUB zugeordnet sein oder im technischen System TS oder im Subsystem SUB integriert sein. Vorzugsweise ist die Vorrichtung 100
30
35

nahe am Subsystem SUB oder am technischen System TS installiert, um lediglich einen kurzen Kommunikationsweg zum Übertragen der Regelparameter aufzuweisen.

5 Dem autonomen Roboter TS ist mindestens einen Sensor 101, wie z.B. eine Kamera, zugeordnet, mit dem die Position und Ausrichtung des Endeffektors und dessen Umgebung UM erfasst werden kann, siehe Figur 3A. Der mindestens eine Sensor 101 ist vorzugsweise mit der Vorrichtung 100 gekoppelt. Beispielsweise
10 erfasst eine Kamera 101 lediglich einen vorgegebenen Bereich der Umgebung des technischen Systems TS, wie z.B. dessen Aktionsbereich. Die erfassten Daten der Umgebung UM und z.B. der Ausrichtung des Endeffektors SUB werden für eine computergestützte Simulation des Roboters als Ausgangswerte
15 bereitgestellt. Des Weiteren kann durch die Kamera in der Umgebung des autonomen Roboters TS ein Objekt OBJ detektiert werden. Die Daten eines Ausgangszustands AZ umfassen beispielsweise das Objekt OBJ, dessen Position und die Position des Endeffektors.

20

Es wird ein Zielzustand ZZ als Datensatz vorgegeben, wie z.B. das Fangen des Objektes OBJ durch den Endeffektor SUB, wie in Figur 3C dargestellt. Beispielsweise kann der Zielzustand ZZ abhängig vom Ausgangszustand AZ ermittelt werden. Der Ausgangszustand AZ kann beispielsweise den Zustand des Objektes, wie z.B. „auf einer Flugbahn“, umfassen. Abhängig von diesem
25 Ausgangszustand AZ kann ein Zielzustand ZZ „Objekt fangen“ ermittelt werden.

30 In der Vorrichtung 100 wird ausgehend vom Ausgangszustand AZ und in Bezug auf den Zielzustand ZZ eine computergestützte physikalische Simulation des Roboters und/oder des Endeffektors und dessen Umgebung durchgeführt. Dazu wird zunächst, beispielsweise von einer Speichereinheit 109, aus einer Vielzahl
35 an physikalischen Simulationsmodellen des Roboters TS eines ausgewählt, das zumindest teilweise mit der erfassten Umgebung UM und/oder dem erfassten Ausgangszustand AZ übereinstimmt. Mittels des selektierten physikalischen Simulati-

onsmodells werden in der Vorrichtung 100 verschiedene Kombinationen von Handlungsschritten ausgehend vom Ausgangszustand AZ und in Bezug auf den Zielzustand ZZ durchgeführt. Insbesondere umfasst das Simulationsmodell physikalische Eigenschaften des technischen Systems TS und dessen Umgebung UM.
5 Zusätzlich können für ein detektiertes Objekt OBJ physikalische Eigenschaften, wie z.B. Gewicht, aus einer Datenbank abgerufen und im Simulationsmodell verwendet werden.

10 Beispielsweise können verschiedene Pfade des Objektes OBJ bzw. Handlungsschritte des Endeffektors SUB, die zum Zielzustand ZZ führen, simuliert werden, wie in Figur 3B dargestellt. Ausgehend vom Anfangszustand AZ, wobei sich das Objekt OBJ im gezeigten Ausführungsbeispiel auf einer Flugbahn
15 F befindet, und in Bezug auf den Zielzustand ZZ, „Fangen des Objektes“ durch den Endeffektor SUB, können verschiedene Handlungsschritte kombiniert und simuliert werden. Beispielsweise kann der Endeffektor das Objekt OBJ im Flug fangen, d.h. der Endeffektor SUB des Roboters TS soll derart mittels
20 Regelparametern gesteuert werden, dass von diesem der Pfad P1 ausgeführt wird. Alternativ kann, unter Berücksichtigung der Gravitation, das Objekt OBJ den Pfad P2a und P2b durchlaufen, d.h. einen Parabelflug mit Aufprall auf dem Boden durchführen. Folglich kann der Endeffektor SUB andere Handlungsschritte durchführen, um das Objekt OBJ nach dem Aufprall im
25 Flug auf dem Pfad P2b zu fangen.

Mittels einer rechnergestützten Simulation und einer maschinellen Lernroutine gemäß der Erfindung kann ermittelt werden,
30 welche der Kombination aus Handlungsschritten günstiger für das technische System TS ist. Dabei kann beispielsweise berücksichtigt werden, dass das Objekt OBJ nach dem Aufprall langsamer fliegt und daher sicherer vom Endeffektor SUB gefangen werden kann.

35

Die Simulationsdaten der verschiedenen Kombinationen aus Handlungsschritten werden an das Trainingsmodul 105 der Vorrichtung 100 übermittelt, um eine maschinelle Lernroutine

derart zu trainieren, eine Kombination aus günstigen Handlungsschritten zu ermitteln. Die maschinelle Lernroutine wird anhand der Simulationsdaten als Trainingsdaten trainiert. Dazu werden die einzelnen simulierten Handlungsschritte jeweils
5 bewertet. Beispielsweise wird ein Handlungsschritt anhand seines Ergebnisses bewertet. Anhand der trainierten maschinellen Lernroutine kann eine günstige Kombination aus Handlungsschritten ermittelt werden. Eine günstige Kombination aus Handlungsschritten kann beispielsweise ein schnelles und
10 energieeffizientes Greifen des Objektes OBJ durch den Endeffektor SUB des Roboters TS als Resultat aufweisen.

Die ermittelte Kombination aus günstigen Handlungsschritten wird an den Roboter oder direkt den Endeffektor übertragen
15 und mittels der entsprechenden Regelparameter ausgeführt. Der Endeffektor kann die einzelnen Handlungsschritte, denen vorzugsweise eine günstige Gesamtbewertung zugeordnet ist, durchführen, so dass der vorgegebene Zielzustand ZZ erreicht wird, siehe Figur 3C.

20 Alle beschriebenen und/oder gezeichneten Merkmale können im Rahmen der Erfindung vorteilhaft miteinander kombiniert werden. Die Erfindung ist nicht auf die beschriebenen Ausführungsbeispiele beschränkt.

25

Patentansprüche

1. Verfahren zum rechnergestützten Ermitteln von Regelparametern für eine günstige Handlung eines technischen Systems, umfassend die Verfahrensschritte:

- 5
- Erfassen (1) eines Ausgangszustands (AZ) und einer Umgebung (UM) des technischen Systems (TS) mittels mindestens eines Sensors (101),
 - Ermitteln (2) eines Zielzustandes (ZZ) für das technische System (TS),
 - 10 - Selektieren (3) eines physikalischen Simulationsmodells (SIM) des technischen Systems (TS) und dessen Umgebung, das zumindest teilweise mit der Umgebung (UM) und/oder dem Ausgangszustand (AZ) übereinstimmt,
 - 15 - Anpassen (4) von Ausgangswerten des physikalischen Simulationsmodells (SIM) an die Umgebung (UM) und/oder den Ausgangszustand (AZ),
 - Simulieren (5) verschiedener Kombinationen aus Handlungsschritten des technische Systems (TS) mittels des physikalischen Simulationsmodells (SIM), ausgehend von den Ausgangswerten und in Bezug auf den Zielzustand (ZZ), wobei Regelparameter des technische Systems (TS) zum Ausführen der Handlungsschritte variiert werden, und Ausgeben von jeweiligen resultierenden Simulationsdaten,
 - 20 - Trainieren (6) einer maschinellen Lernroutine anhand der jeweiligen resultierenden Simulationsdaten mittels einer Bewertung eines jeweiligen Handlungsschrittes,
 - Ermitteln (7) einer optimierten Kombination aus Handlungsschritten anhand der trainierten maschinellen Lernroutine, wobei der optimierten Kombination aus Handlungsschritten eine günstige Bewertung zugeordnet ist,
 - 30 und
 - Ausgeben (8) der Regelparameter der optimierten Kombination aus Handlungsschritten zum Steuern des technischen System (TS).
 - 35

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei mindestens ein physikalisches Simulationsmodell (SIM) des technischen Systems und

dessen Umgebung generiert und gespeichert und anschließend zur Selektion bereitgestellt wird.

3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei
5 die maschinelle Lernroutine trainiert wird, sobald Simulationsdaten von mindestens einer Kombination aus Handlungsschritten verfügbar sind.
4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei
10 die Bewertung eines Handlungsschrittes abhängig von einem Ergebnis eines Handlungsschritts in Bezug auf den Zielzustand (ZZ) ausgeführt wird.
5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei
15 der Zielzustand (ZZ) abhängig vom erfassten Anfangszustand (AZ) und/oder von der erfassten Umgebung des technischen Systems ermittelt wird.
6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei
20 das physikalische Simulationsmodell (SIM) abhängig vom Ausgangszustand (AZ) und/oder vom Zielzustand (ZZ) und/oder von der Umgebung (UM) und/oder von einer Art des technischen Systems (TS) konstruiert wird.
7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei
25 physikalische Eigenschaften eines Objektes (OBJ) in der Umgebung (UM) des technischen Systems (TS) als Parameterdaten erfasst, in einer Speichereinheit gespeichert und im physikalischen Simulationsmodell (SIM) integriert werden.
30
8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei
35 die Simulation des technischen Systems (TS) und das Training der maschinellen Lernroutine für mehr als einen Zielzustand (ZZ) und/oder für mehr als einen Ausgangszustand (AZ) des technischen Systems (TS) durchgeführt werden und jeweils eine optimierte Kombination aus Handlungsschritten für das technische System (TS) mit einer günstigen Bewertung ermittelt und in einer Speichereinheit gespeichert wird.

9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei Regelparameter für eine optimierte Kombination aus Handlungsschritten mit einer günstigen Bewertung in Abhängigkeit eines Zielzustandes (ZZ) in einer Speichereinheit gespeichert werden.
5
10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei verschiedene Kombinationen aus Handlungsschritten des technischen Systems (TS) zeitlich parallel auf mehr als einer Recheneinheit simuliert werden.
10
11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Umgebung (UM) und/oder der Ausgangszustand (AZ) des technischen Systems (TS) fortlaufend mittels mindestens eines Sensors (101) erfasst werden und das physikalische Simulationsmodell (SIM) mittels der Sensordaten fortlaufend angepasst wird.
15
12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Regelparameter an das technische System (TS) übertragen (9) werden und die optimierte Kombination aus Handlungsschritten durch das technische System (TS) ausgeführt wird (10).
20
13. Verfahren nach Anspruch 12, wobei ein Ergebnis der ausgeführten optimierten Kombination aus Handlungsschritten bewertet wird und diese Bewertung zum Trainieren der maschinellen Lernroutine bereitgestellt wird (11).
25
14. Vorrichtung (100) zum rechnergestützten Ermitteln von Regelparametern für eine günstige Handlung eines technischen Systems, umfassend:
30
- mindestens einen Sensor (101), der derart eingerichtet ist, einen Ausgangszustand (AZ) und einer Umgebung (UM) des technischen Systems (TS) zu erfassen,
35

- ein Zielmodul (102), das derart eingerichtet ist, einen Zielzustand (ZZ) für das technische System (SUB) zu ermitteln,
 - ein Modellierungsmodul (103), das derart eingerichtet ist, ein physikalisches Simulationsmodell (SIM) des technischen Systems (TS) und dessen Umgebung zu selektieren, das zumindest teilweise mit der Umgebung (UM) und/oder dem Ausgangszustand (AZ) übereinstimmt, und Ausgangswerte des physikalischen Simulationsmodells (SIM) an die Umgebung (UM) und/oder den Ausgangszustand (AZ) anzupassen,
 - ein Simulationsmodul (104), das derart eingerichtet ist, verschiedene Kombinationen aus Handlungsschritten des technischen Systems (TS) mittels des physikalischen Simulationsmodells (SIM), ausgehend von den Ausgangswerten und in Bezug auf den Zielzustand (ZZ), zu simulieren, wobei Regelparameter des technischen Systems (TS) zum Ausführen der Handlungsschritte variiert werden, und jeweilige resultierende Simulationsdaten auszugeben,
 - ein Trainingsmodul (105), das derart eingerichtet ist, eine maschinelle Lernroutine anhand der jeweiligen resultierenden Simulationsdaten mittels einer Bewertung eines jeweiligen Handlungsschrittes zu trainieren,
 - ein Optimierungsmodul (106), das derart eingerichtet ist, eine optimierte Kombination aus Handlungsschritten anhand der trainierten maschinellen Lernroutine zu ermitteln, wobei der optimierten Kombination aus Handlungsschritten eine günstige Bewertung zugeordnet ist, und
 - ein Ausgabemodul (107), das derart eingerichtet ist, die Regelparameter der optimierten Kombination aus Handlungsschritten zum Steuern des technischen Systems (TS) auszugeben.
15. Vorrichtung nach Anspruch 14, umfassend ein Übertragungsmodul (108) zum Übertragen der Regelparameter an das technische System (TS).

16. Vorrichtung nach Anspruch 14 oder 15 umfassend mindestens eine Speichereinheit (109) und/oder mindestens eine Recheneinheit (110).
- 5 17. Computerprogrammprodukt, das direkt in einen programmierbaren Computer ladbar ist, umfassend Programmcodeteile, die dazu geeignet sind, die Schritte des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 13 durchzuführen.

FIG 1

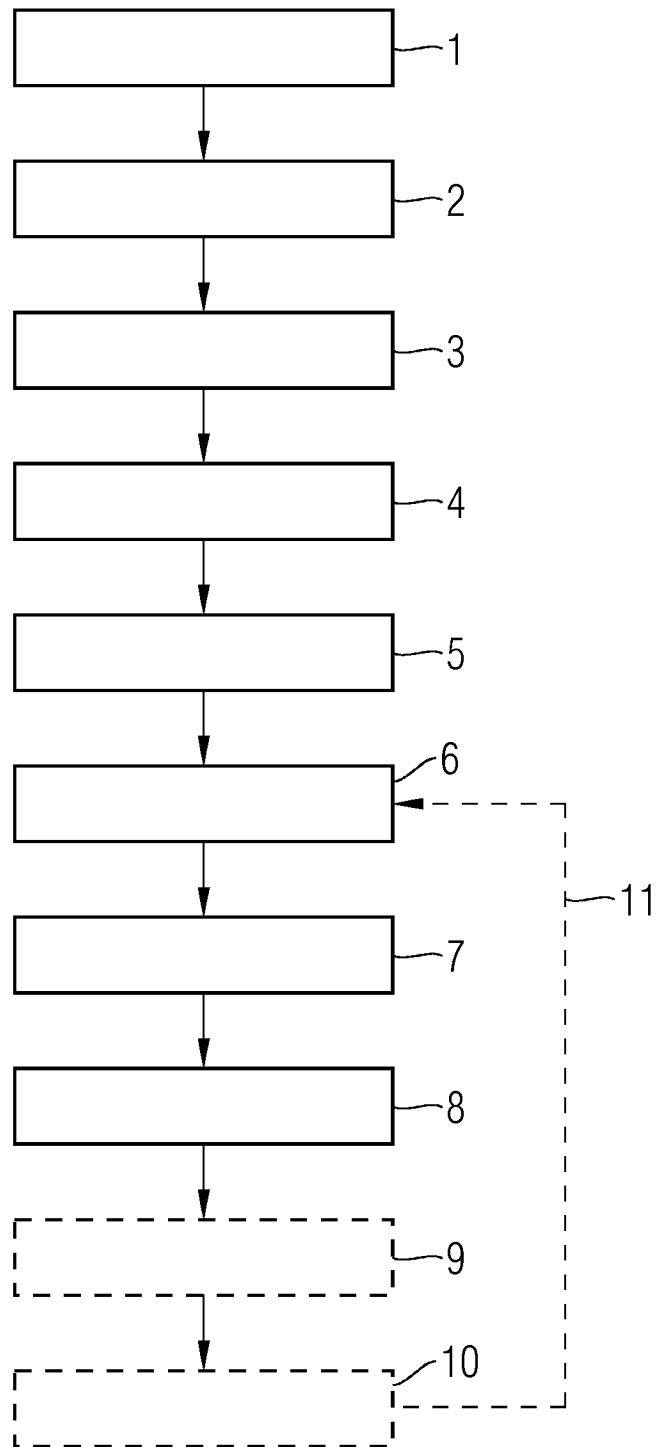


FIG 2

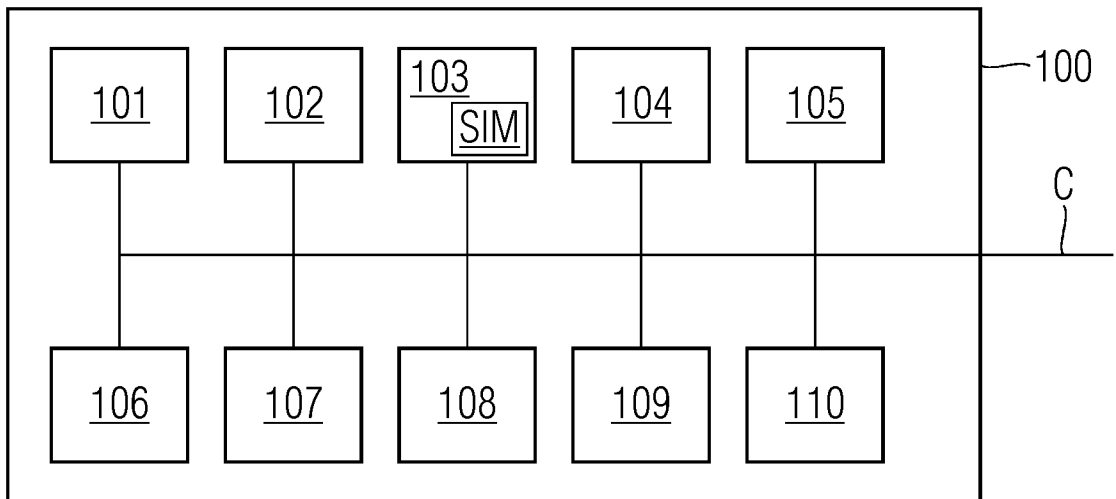


FIG 3

FIG 3A

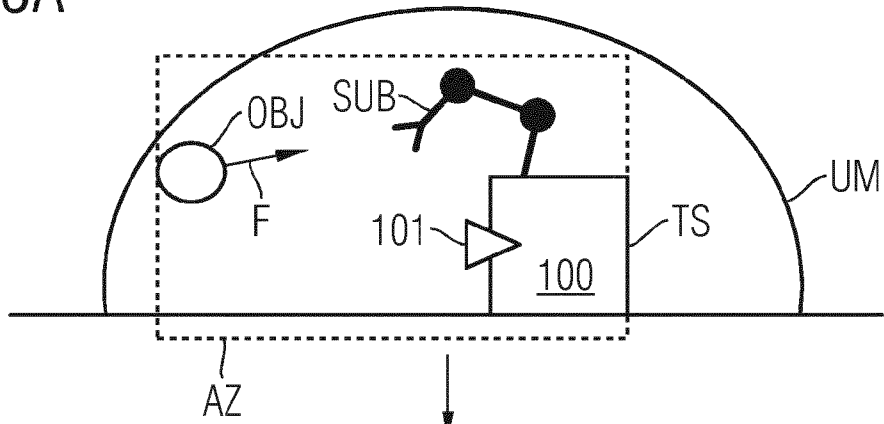


FIG 3B

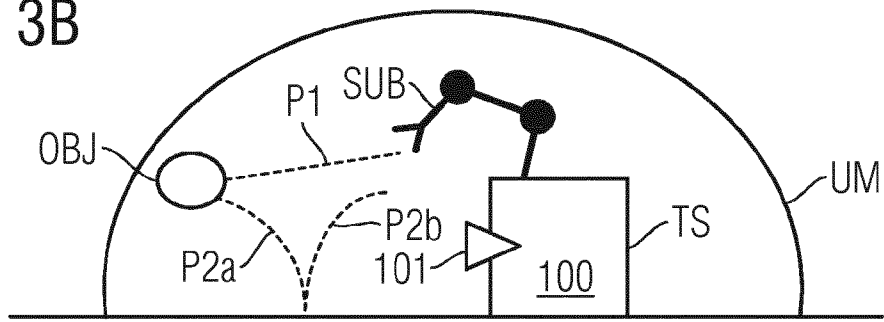
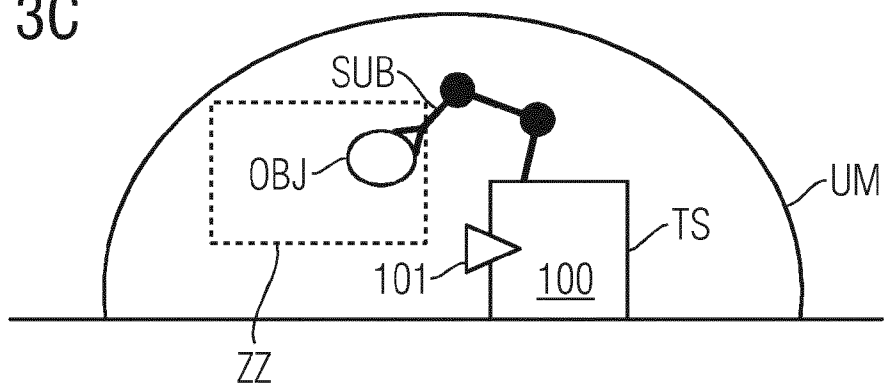


FIG 3C



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2019/066139

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER <i>B25J 9/16</i> (2006.01)i; <i>G05B 13/02</i> (2006.01)i		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) B25J; G05B		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) EPO-Internal, WPI Data		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X Y	US 9811074 B1 (AICHELE FABIAN [DE] ET AL) 07 November 2017 (2017-11-07) abstract; figures 1-7 column 2, line 15 - column 3, line 23 column 3, line 55 - column 11, line 48	1-10,14,17 11-13,15,16
Y	WO 2018087546 A1 (DOGTOOTH TECH LIMITED [GB]) 17 May 2018 (2018-05-17) abstract; figures 1-8 page 4 - page 67	1-17
Y	SOMPURA JAY N ET AL. "Experimental study: Neural network based model predictive control of a distributed parameter system" <i>2016 12TH IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONTROL AND AUTOMATION (ICCA), IEEE</i> , 01 June 2016 (2016-06-01), pages 529-534 DOI: 10.1109/ICCA.2016.7505331 XP032919061 the whole document	1-17
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.		
<p>* Special categories of cited documents:</p> <p>“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance</p> <p>“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date</p> <p>“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)</p> <p>“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means</p> <p>“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</p> <p>“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention</p> <p>“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone</p> <p>“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art</p> <p>“&” document member of the same patent family</p>		
Date of the actual completion of the international search 25 September 2019		Date of mailing of the international search report 11 October 2019
Name and mailing address of the ISA/EP European Patent Office p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk Netherlands Telephone No. (+31-70)340-2040 Facsimile No. (+31-70)340-3016		Authorized officer Lalinde, Rafael Telephone No.

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	GAUTAM AJAY ET AL. "Stabilizing model predictive control using parameter-dependent dynamic policy for nonlinear systems modeled with neural networks" <i>JOURNAL OF PROCESS CONTROL, OXFORD, GB</i> , Vol. 36, 05 November 2015 (2015-11-05), pages 11-21 DOI: 10.1016/J.PROCONT.2015.09.003 ISSN: 0959-1524, XP029309432 the whole document	1-17

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/EP2019/066139

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
US	9811074	B1	07 November 2017	NONE	
WO	2018087546	A1	17 May 2018	AU 2017357645	A1 23 May 2019
				CN 110139552	A 16 August 2019
				EP 3537867	A1 18 September 2019
				US 2019261565	A1 29 August 2019
				US 2019261566	A1 29 August 2019
				WO 2018087546	A1 17 May 2018

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2019/066139

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES INV. B25J9/16 G05B13/02 ADD.		
Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC		
B. RECHERCHIERTE GEBIETE		
Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole) B25J G05B		
Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen		
Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe) EPO-Internal, WPI Data		
C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	US 9 811 074 B1 (AICHELE FABIAN [DE] ET AL) 7. November 2017 (2017-11-07)	1-10,14, 17
Y	Zusammenfassung; Abbildungen 1-7 Spalte 2, Zeile 15 - Spalte 3, Zeile 23 Spalte 3, Zeile 55 - Spalte 11, Zeile 48 -----	11-13, 15,16
Y	WO 2018/087546 A1 (DOGTTOOTH TECH LIMITED [GB]) 17. Mai 2018 (2018-05-17) Zusammenfassung; Abbildungen 1-8 Seite 4 - Seite 67 ----- -/--	1-17
<input checked="" type="checkbox"/> Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen <input checked="" type="checkbox"/> Siehe Anhang Patentfamilie		
* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen : "A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist "E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist "L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt) "O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht "P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist "T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist "X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden "Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist "&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist		
Datum des Abschlusses der internationalen Recherche 25. September 2019		Absendedatum des internationalen Recherchenberichts 11/10/2019
Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016		Bevollmächtigter Bediensteter Lalinde, Rafael

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
Y	<p>SOMPURA JAY N ET AL: "Experimental study: Neural network based model predictive control of a distributed parameter system", 2016 12TH IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONTROL AND AUTOMATION (ICCA), IEEE, 1. Juni 2016 (2016-06-01), Seiten 529-534, XP032919061, DOI: 10.1109/ICCA.2016.7505331 das ganze Dokument</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	1-17
Y	<p>GAUTAM AJAY ET AL: "Stabilizing model predictive control using parameter-dependent dynamic policy for nonlinear systems modeled with neural networks", JOURNAL OF PROCESS CONTROL, OXFORD, GB, Bd. 36, 5. November 2015 (2015-11-05), Seiten 11-21, XP029309432, ISSN: 0959-1524, DOI: 10.1016/J.JPROCONT.2015.09.003 das ganze Dokument</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	1-17

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2019/066139

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
US 9811074	B1	07-11-2017 KEINE	

WO 2018087546	A1	AU 2017357645 A1	23-05-2019
		CN 110139552 A	16-08-2019
		EP 3537867 A1	18-09-2019
		US 2019261565 A1	29-08-2019
		US 2019261566 A1	29-08-2019
		WO 2018087546 A1	17-05-2018
