



(10) **DE 10 2019 202 702 B3** 2020.08.13

(12)

## Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2019 202 702.4**  
(22) Anmeldetag: **28.02.2019**  
(43) Offenlegungstag: –  
(45) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: **13.08.2020**

(51) Int Cl.: **G05D 1/02 (2020.01)**  
**G06G 7/78 (2006.01)**  
**G01C 21/04 (2006.01)**  
**G01C 21/34 (2006.01)**  
**G09B 29/00 (2006.01)**  
**G06Q 10/04 (2012.01)**

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:  
**KUKA Deutschland GmbH, 86165 Augsburg, DE**

(74) Vertreter:  
**Wallinger Ricker Schlotter Tostmann Patent-  
und Rechtsanwälte Partnerschaft mbB, 80331  
München, DE**

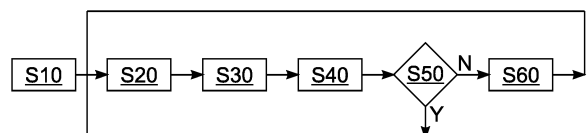
(72) Erfinder:  
**Soragna, Alberto, Brescello, IT; Baldini, Marco,  
86161 Augsburg, DE; Kümmerle, Rainer, Dr.,  
81539 München, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

<b>DE</b>	<b>10 2013 211 126</b>	<b>A1</b>
<b>EP</b>	<b>3 327 697</b>	<b>A1</b>
<b>WO</b>	<b>2019/ 025 788</b>	<b>A1</b>

(54) Bezeichnung: **Abfahren einer vorgegebenen Anordnung von Wegen mit einem mobilen Roboter**

(57) Zusammenfassung: Nach einem erfindungsgemäßen Verfahren zum Abfahren einer vorgegebenen Anordnung von Wegen (K1 - K2, K2 - K3, K1 - K5), die in Knoten (K1,...,K10) miteinander verbunden sind, mit einem mobilen, insbesondere autonomen, Roboter (1), wobei der Roboter von einer Ausgangs-Route, die alle noch nicht abgefahrenen Wege enthält, zu einer hiervon verschiedenen Ersatz-Route wechselt (S60), die eine Schleifen-Route, welche wenigstens einen Weg nach Durchfahren dieses Weges und wenigstens eines weiteren Weges erneut durchfährt, und eine daran anschließende Rest-Route aufweist, die alle dann noch nicht abgefahrenen Wege enthält, falls ein Wert einer Gütefunktion für die Ersatz-Route kleiner als ein Wert dieser Gütefunktion für die Ausgangs-Route ist, wobei die Gütefunktion von einem ersten Aufwand, einem zweiten Aufwand und einer variablen Gewichtung des ersten und zweiten Wertes zueinander abhängt; wobei der erste Aufwand der kleinere von einem minimalen Aufwand für eine Schleifen-Route, welche wenigstens einen Weg nach Durchfahren dieses Weges und wenigstens eines weiteren Weges erneut durchfährt, und einem minimalen Aufwand für eine Ziel-Route, die alle noch nicht abgefahrenen Wege enthält; und der zweite Aufwand ein minimaler Aufwand für eine Rest-Route ist, die alle nach dieser Schleifen-Route noch nicht abgefahrenen Wege enthält; und die variable Gewichtung den zweiten Aufwand für eine erste Lokalisierungsunsicherheit des Roboters niedriger gewichtet als für ...



### Beschreibung

**[0001]** Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zum Abfahren einer vorgegebenen Anordnung von Wegen, die in Knoten miteinander verbunden sind, mit einem mobilen, insbesondere autonomen, Roboter, sowie ein System und ein Computerprogrammprodukt zur Durchführung des Verfahrens.

**[0002]** Bei der simultanen Posenbestimmung und Kartenerstellung („Simultaneous Localization and Mapping“, SLAM) erstellt ein mobiler Roboter gleichzeitig eine Karte seiner Umgebung und ermittelt seine Pose innerhalb dieser Karte.

**[0003]** Insbesondere hierzu kann einem, insbesondere autonomen, mobilen Roboter eine Anordnung von Wegen, die in Knoten miteinander verbunden sind, vorgegeben werden. Der Roboter kann dann diese Wege (autonom) abfahren und dabei eine simultane Posenbestimmung und Kartenerstellung durchführen. Auf diese Weise kann vorteilhaft a priori-Wissen über die Umgebung genutzt und so die Erkundung der Umgebung durch den Roboter verbessert werden.

**[0004]** Somit stellen autonome Roboter und/oder eine simultanen Posenbestimmung und Kartenerstellung besonders vorteilhafte Anwendungen der vorliegenden Erfindung dar, ohne dass diese hierauf beschränkt ist, sondern generell das Abfahren einer vorgegebenen Anordnung von Wegen, die in Knoten miteinander verbunden sind, mit einem mobilen Roboter verbessern kann.

**[0005]** Die DE 10 2013 211 126 A1 betrifft ein Verfahren zum Modellieren eines Umfelds eines Fahrzeugs, umfassend die Schritte: Gewinnen von Umfelddaten für eine Vielzahl von Messpositionen durch Erfassen des Umfelds durch zumindest einen Sensor, Speichern der Messpositionen, Bereitstellen einer Vielzahl von Kacheln, insbesondere von GridTiles, zum Speichern der Umfelddaten, Speichern der Umfelddaten in zumindest einer ersten Kachel und in zumindest einer zweiten Kachel eines ersten Umfeldmodells, wobei die erste Kachel und die zweite Kachel einen Teilbereich des Umfelds repräsentiert, Speichern von zumindest einem eindeutigen Merkmal aus den Umfelddaten der ersten Kachel und einer zugehörigen ersten Messposition, an der das Merkmal erfasst wurde, Speichern einer gefahrenen Trajektorie des Fahrzeugs, Erfassen des Merkmals aus einer zweiten Messposition innerhalb der zweiten Kachel, wobei die Umfelddaten der ersten Kachel und der zweiten Kachel nicht identisch sind, Ermitteln einer korrigierten Messposition und einer korrigierten Trajektorie aus der ersten Messposition und der zweiten Messposition und der gefahrenen Trajektorie, und Erstellen eines zweiten Umfeldmodells durch Einfügen von anhand der korrigierten Trajektorie korrigierten Umfelddaten des ersten Umfeldmodells.

**[0006]** Die EP 3 327 697 A1 betrifft Verfahren und Vorrichtungen, die einen visuellen Sensor und Dead-Reckoning-Sensoren verwenden, um Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) zu verarbeiten, wobei bestimmte Ausführungsformen Verbesserungen der Front-End-Verarbeitung in einem SLAM-basierten System, insbesondere einen Landmark-Matching-Prozess, einen Prozess zur Erstellung von Orientierungspunkten, bzw. Verbesserungen der Back-End-Verarbeitung in einem SLAM-basierten System vorsehen und insbesondere Algorithmen zum Modifizieren des SLAM-Graphen in Echtzeit betrachten, um eine effizientere Struktur zu erreichen.

**[0007]** Die WO 2019/ 025 788 A1 betrifft ein computerimplementiertes Verfahren zum Konstruieren eines Modells der Bewegung eines mobilen Geräts, wobei das Verfahren umfasst: Verwenden eines Sensors des Geräts zum Erhalten von Positionsdaten, die eine geschätzte Pose des mobilen Geräts bereitstellen, Erzeugen eines anfänglichen Graphen basierend auf Positionsdaten von dem Sensor, wobei Knoten des Graphen eine Reihe möglicher Posen der Vorrichtung darstellen und Kanten Odometrie- und / oder Schleifenschließungsbeschränkungen darstellen; Verarbeiten des Graphen zum Schätzen von Konfidenzwerten für jeden Schleifenschluss durch Durchführen paarweiser Konsistenztests zwischen jedem Schleifenschluss und einer Reihe anderer Schleifenschließungen; und Erzeugen eines erweiterten Graphen aus dem anfänglichen Graphen durch Beibehalten oder Löschen von jeden Schleifenschluss basierend auf den Konfidenzwerten.

**[0008]** Eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es entsprechend, das Abfahren einer vorgegebenen Anordnung von Wegen, die in Knoten miteinander verbunden sind, mit einem mobilen, insbesondere autonomen, Roboter zu verbessern.

**[0009]** Diese Aufgabe wird durch ein Verfahren mit den Merkmalen des Anspruchs 1 gelöst. Ansprüche 7, 8 stellen ein System bzw. Computerprogrammprodukt zur Durchführung eines hier beschriebenen Verfahrens unter Schutz. Die Unteransprüche betreffen vorteilhafte Weiterbildungen.

**[0010]** Nach einer Ausführung der vorliegenden Erfindung wechselt ein mobiler, in einer Ausführung autonomer, Roboter beim Abfahren einer vorgegebenen Anordnung von Wegen, die in Knoten miteinander verbunden sind, insbesondere automatisiert und/oder für wenigstens einen, insbesondere an wenigstens einem, angefahrenen (der) Knoten, von einer Ausgangs-Route, die alle (bisher) noch nicht abgefahrenen Wege enthält, zu einer hiervon verschiedenen Ersatz-Route, falls (ermittelt wird, dass) ein Wert einer Gütefunktion für die Ersatz-Route kleiner als ein Wert dieser Gütefunktion für die Ausgangs-Route ist.

**[0011]** In einer Weiterbildung wechselt der Roboter, insbesondere automatisiert und/oder für wenigstens einen, insbesondere an wenigstens einem, (der) angefahrenen Knoten, von der Ausgangs-Route zu derjenigen von mehreren Ersatz-Route(n), für die der Wert dieser Gütefunktion am kleinsten ist.

**[0012]** Entsprechend werden in einer Ausführung (für den jeweiligen Knoten) jeweils die Werte der Gütefunktion für die (bisher geplante) Ausgangs-Route und die Ersatz-Route(n) ermittelt und dann die Route mit dem kleineren bzw. kleinsten Wert des Gütekriteriums als neue (Ausgangs-)Route verwendet bzw. deren nächste (r) Knoten mit dem Roboter angefahren.

**[0013]** In einer Ausführung verbinden die Ausgangs-Route, die Ersatz-Route(n) und/oder die Ziel-Route(n) jeweils den angefahrenen (der) Knoten mit einem bzw. demselben vorgegebenen Zielknoten.

**[0014]** Die Ersatz-Route(n) weist bzw. weisen in einer Ausführung (jeweils) eine, in einer Ausführung nächstliegende, Schleifen-Route, welche bzw. auf der der Roboter wenigstens einen Weg nach Durchfahren dieses Weges und wenigstens eines weiteren Weges erneut durchfährt, und eine daran anschließende Rest-Route auf, die alle dann noch nicht abgefahrenen Wege enthält, in einer Ausführung besteht die (jeweilige) Ersatz-Route hieraus.

**[0015]** Die Gütefunktion hängt in einer Ausführung von einem ersten Aufwand, einem zweiten Aufwand und einer variablen Gewichtung des ersten und zweiten Wertes zueinander ab. In einer Weiterbildung kann die Gütefunktion eine gewichtete Summe  $C_E = C_1 + K \cdot C_2$  mit der Gütefunktion  $C_E$ , dem ersten Aufwand  $C_1$ , dem zweiten Aufwand  $C_2$  und einer Gewichtung  $K$  sein, die vorzugsweise auf einen Bereich  $[0; 1]$  normiert sein kann, so dass in einer Ausführung der zweite Aufwand maximal gleich dem ersten Aufwand gewichtet und minimal mit Null gewichtet bzw. ausgeblendet wird.

**[0016]** Der erste Aufwand ist in einer Ausführung der kleinere von a) einem minimalen Aufwand für eine, insbesondere nächstliegende, Schleifen-Route, welche wenigstens einen Weg nach Durchfahren dieses Weges und wenigstens eines weiteren Weges erneut durchfährt, und b) einem minimalen Aufwand für eine Ziel-Route, die alle noch nicht abgefahrenen Wege und in einer Ausführung keine Schleifen-Route enthält: erster Aufwand = Minimum(minimaler Aufwand für Schleifen-Route; minimaler Aufwand für Ziel-Route).

**[0017]** In einer Ausführung ist der erste Aufwand somit der minimale Aufwand für eine bzw. die nächstliegende Schleifen-Route, sofern eine bzw. mehrere solche vorhanden ist/sind, und andernfalls der minimale Aufwand für die Ziel-Route. Bei (einer) der Ersatz-Route(n) ist der erste Aufwand somit in einer Ausführung der Aufwand für deren (nächstliegende) Schleifen-Route. Bei der Ausgangs-Route ist der erste Aufwand in einer Ausführung ebenfalls der Aufwand für deren (nächstliegende) Schleifen-Route, sofern sie eine solche aufweist, und andernfalls der minimale Aufwand für die Ausgangs-Route.

**[0018]** Der zweite Aufwand ist in einer Ausführung ein minimaler Aufwand für eine Rest-Route, die alle nach der (für den ersten Aufwand verwendeten bzw. maßgeblichen) Schleifen-Route noch nicht abgefahrenen Wege enthält, für die Ersatz-Route(n) somit in einer Ausführung der minimaler Aufwand für deren Rest-Route(n), für die Ausgangs-Route in einer Ausführung der Aufwand für deren Rest nach ihrer (nächstliegenden) Schleifen-Route, sofern die Ausgangs-Route eine solche aufweist, und andernfalls gleich Null.

**[0019]** Die variable Gewichtung gewichtet in einer Ausführung den zweiten Aufwand für eine erste Lokalisierungsunsicherheit des Roboters niedriger als für eine kleinere zweite Lokalisierungsunsicherheit des Roboters bzw. wird entsprechend ermittelt. In einer Weiterbildung gewichtet die variable Gewichtung den zweiten Aufwand für eine minimale Lokalisierungsunsicherheit des Roboters maximal, insbesondere gleich dem ersten Aufwand, und/oder für eine maximale Lokalisierungsunsicherheit des Roboters minimal, in einer Ausführung mit Null. Entsprechend hängt die Gewichtung in einer Ausführung von der Lokalisierungsunsicherheit des Roboters, insbesondere für den bzw. an dem angefahrenen (der) Knoten ab und ist insofern variabel.

**[0020]** Dem liegen in einer Ausführung die folgenden Ideen zugrunde:

Beim Abfahren einer Route kann eine Lokalisierungsunsicherheit des Roboters zunehmen, insbesondere aufgrund statistischer Phänomene, Sensorungenauigkeiten oder dergleichen.

**[0021]** Durch das Abfahren von Schleifen-Routen bzw. das erneute Abfahren wenigstens eines Weges, nachdem dieser Weg und wenigstens ein weiterer Weg bereits wenigstens einmal abgefahren worden sind, kann diese Lokalisierungsunsicherheit reduziert werden, da der Roboter sozusagen auf (nun) bekanntem Terrain unterwegs ist bzw. die mehrfach abgefahrenen Wege abgleichen kann. Dabei wird in einer Ausführung der triviale Fall eines unmittelbar aufeinanderfolgenden gegensinnigen Durchfahrens eines Weges außer Acht gelassen, da diese die Lokalisierungsunsicherheit nur geringfügig verbessert.

**[0022]** In einer Ausführung wird, insbesondere für den bzw. an dem angefahrenen Knoten, die (aktuelle) Lokalisierungsunsicherheit des Roboters ermittelt. In einer Ausführung werden dann, in einer Weiterbildung nur bei Überschreiten eines Lokalisierungsunsicherheitsschwellwertes, eine oder mehrere Ersatz-Routen geplant, die jeweils (wenigstens) eine solche Schleifen-Route aufweisen und somit die Lokalisierungsunsicherheit reduzieren.

**[0023]** Durch das Gütekriterium wird der Aufwand für diese Ersatz-Route(n) mit dem Aufwand für die (bisher geplante) Ausgangs-Route verglichen und dabei die (ermittelte) Lokalisierungsunsicherheit des Roboters berücksichtigt: weist der Roboter eine niedrige(re) Lokalisierungsunsicherheit auf oder enthält die Ausgangs-Route ohnehin eine (naheliegende) Schleifen-Route, lohnt sich die Ersatz-Route sozusagen nicht und der Roboter wechselt nicht.

**[0024]** Weist der Roboter hingegen eine größere bzw. große Lokalisierungsunsicherheit auf und enthält die Ausgangs-Route keine (ausreichend naheliegende) Schleifen-Route, so reduziert sich der Wert der Gütefunktion der Ersatz-Route aufgrund der niedrige(n) Gewichtung ihres zweiten Aufwands für ihre Rest-Route, so dass der Roboter gezielt zu der (entsprechenden) Ersatz-Route wechselt.

**[0025]** Dadurch kann in einer Ausführung zugleich die Genauigkeit und Geschwindigkeit optimiert werden.

**[0026]** In einer Ausführung werden, insbesondere an dem angefahrenen (der) Knoten und/oder beim Abfahren des Weges zu diesem Knoten, eine oder mehrere Posen des Roboters in seiner Umgebung bestimmt, in einer Ausführung mithilfe eines oder mehrerer roboterfester und/oder eines oder mehrerer umgebungsfester Sensoren.

**[0027]** Eine Pose umfasst dabei in einer Ausführung eine ein-, zwei- oder dreidimensionale Position und/oder eine ein-, zwei- oder dreidimensionale Orientierung des Roboters, in einer bevorzugten Ausführung eine zweidimensionale Position des Roboters in einer Ebene und eine eindimensionale Orientierung um eine Normale zu dieser Ebene.

**[0028]** In einer Weiterbildung wird auf Basis dieser Pose(n) eine Karte der Umgebung erstellt, wobei ein Erstellen in einer Ausführung ein Aktualisieren einer vorhandenen Karte umfassen, insbesondere sein kann.

**[0029]** Wie bereits erläutert, kann die vorliegende Erfindung mit besonderem Vorteil beim SLAM verwendet werden, insbesondere, um a priori Kenntnisse der Umgebung zu nutzen und dabei zugleich Genauigkeit und Geschwindigkeit zu optimieren.

**[0030]** In einer Ausführung hängt der Aufwand einer Route von ihrer Länge und/oder der zu(ihre)m Abfahren mit dem Roboter (als) erforderlich(prognostizierten Zeit und/oder Energie ab. In einer Weiterbildung wird der Aufwand einer Route auf Basis ihrer Länge und/oder der zu(ihre)m Abfahren mit dem Roboter (als) erforderlich (prognostizierten Zeit und/oder Energie ermittelt.

**[0031]** Hierdurch können in einer Ausführung vorteilhaft kürzeste, schnellste oder energieoptimale Routen abgefahren oder diese Kriterien auch miteinander und/oder mit anderen Kriterien berücksichtigt bzw. optimiert werden.

**[0032]** In einer Ausführung hängt die Lokalisierungsunsicherheit des Roboters (für einen bzw. an einem (der) Knoten) von einer Länge einer bisher (bzw. bis zu diesem Knoten) abgefahrenen Route, einer Anzahl dabei (bereits) durchfahrener Schleifen-Routen und/oder einer Bestimmung einer oder mehrerer Posen des Roboters in seiner Umgebung ab. In einer Weiterbildung wird die Lokalisierungsunsicherheit auf Basis einer Länge einer bisher (bzw. bis zu dem angefahrenen Knoten) abgefahrenen Route, einer Anzahl dabei durchfahrener

Schleifen-Routen und/oder einer Bestimmung einer oder mehrerer Posen des Roboters in seiner Umgebung ermittelt.

**[0033]** Dabei wächst in einer Ausführung die Lokalisierungsunsicherheit mit wachsender Länge der bisher (bzw. bis zu dem Knoten) abgefahrenen Route und/oder sinkt mit wachsender Anzahl dabei durchfahrener Schleifen-Routen bzw. wird derart ermittelt. Dem liegt in einer Ausführung die Idee zugrunde, dass sich mit zunehmender Routenlänge statistische Effekte aufsummieren, andererseits, wie vorstehend erläutert, ihr Einfluss durch Schleifen-Routen reduziert werden kann.

**[0034]** In einer Ausführung hängt die Lokalisierungsunsicherheit des Roboters von einer Kovarianz-Matrix seiner Pose, insbesondere deren (Haupt)Diagonalenbetrag oder -summe ab, in einer Ausführung proportional bzw. linear.

**[0035]** Dadurch kann in einer Ausführung die Lokalisierungsunsicherheit des Roboters vorteilhaft quantifiziert bzw. abgeschätzt werden.

**[0036]** In einer Ausführung werden die Ausgangs-Route und/oder die Ersatz-Route(n) jeweils mit einem Lösungsverfahren für das sogenannte „Briefträgerproblem“ („Chinese Postman Problem“ CPP) ermittelt, insbesondere mit einem Lösungsverfahren für das offene und/oder selektive Briefträgerproblem“ („Open/Rural Chinese Postman Problem“). Dabei kann insbesondere ein Rest einer, insbesondere vorab, ermittelten bzw. initial vorgegebenen Ausgangs-Route ab dem angefahrenen (der) Knoten als Ausgangs-Route verwendet und solcherart im Sinne der vorliegenden Erfindung ermittelt werden.

**[0037]** Nach einer Ausführung der vorliegenden Erfindung ist ein System, insbesondere hard- und/oder software-, insbesondere programmtechnisch, zur Durchführung eines hier beschriebenen Verfahrens eingerichtet und/oder weist auf:

Mittel zum Kommandieren eines Wechsels des Roboters von einer Ausgangs-Route, die alle noch nicht abgefahrenen Wege enthält, zu einer hiervon verschiedenen Ersatz-Route, die eine Schleifen-Route, welche wenigstens einen Weg nach Durchfahren dieses Weges und wenigstens eines weiteren Weges erneut durchfährt, und eine daran anschließende Rest-Route aufweist, die alle dann noch nicht abgefahrenen Wege enthält, falls ein Wert einer Gütefunktion für die Ersatz-Route kleiner als ein Wert dieser Gütefunktion für die Ausgangs Route ist, wobei die Gütefunktion von einem ersten Aufwand, einem zweiten Aufwand und einer variablen Gewichtung des ersten und zweiten Wertes zueinander abhängt;

wobei der erste Aufwand der kleinere von einem minimalen Aufwand für eine Schleifen-Route, welche wenigstens einen Weg nach Durchfahren dieses Weges und wenigstens eines weiteren Weges erneut durchfährt, und einem minimalen Aufwand für eine Ziel-Route ist, die alle noch nicht abgefahrenen Wege enthält;

der zweite Aufwand ein minimaler Aufwand für eine Rest-Route ist, die alle nach dieser Schleifen-Route noch nicht abgefahrenen Wege enthält; und die variable Gewichtung den zweiten Aufwand für eine erste Lokalisierungsunsicherheit des Roboters niedriger gewichtet als für eine kleinere zweite Lokalisierungsunsicherheit des Roboters, insbesondere für eine minimale Lokalisierungsunsicherheit des Roboters maximal, insbesondere gleich dem ersten Aufwand, gewichtet und/oder für eine maximale Lokalisierungsunsicherheit des Roboters minimal gewichtet, insbesondere ausblendet.

**[0038]** In einer Ausführung weist das Verfahren bzw. System bzw. sein(e) Mittel auf:

(Mittel zum) Ermitteln der Ausgangs-Route und/oder Ersatz-Route(n), insbesondere deren Schleifen- und/oder Rest-Route(n);

(Mittel zum) Ermitteln der Gütefunktion, insbesondere des ersten Aufwands, des zweiten Aufwands und/oder der variablen Gewichtung, insbesondere der Lokalisierungsunsicherheit des Roboters;

Mittel zum Kommandieren eines Wechsels des Roboters von der Ausgangs-Route zu derjenigen von mehreren Ersatz Routen, für die der Wert der Gütefunktion am kleinsten ist;

Mittel zum Bestimmen wenigstens einer Pose des Roboters in seiner Umgebung; und/oder

Mittel zum Erstellen einer Karte der Umgebung auf Basis dieser Pose.

**[0039]** Ein Mittel im Sinne der vorliegenden Erfindung kann hard- und/oder softwaretechnisch ausgebildet sein, insbesondere eine, vorzugsweise mit einem Speicher- und/oder Bussystem daten- bzw. signalverbundene,

insbesondere digitale, Verarbeitungs-, insbesondere Mikroprozessoreinheit (CPU), Graphikkarte (GPU) oder dergleichen, und/oder ein oder mehrere Programme oder Programmmodule aufweisen. Die Verarbeitungseinheit kann dazu ausgebildet sein, Befehle, die als ein in einem Speichersystem abgelegtes Programm implementiert sind, abzuarbeiten, Eingangssignale von einem Datenbus zu erfassen und/oder Ausgangssignale an einen Datenbus abzugeben. Ein Speichersystem kann ein oder mehrere, insbesondere verschiedene, Speichermedien, insbesondere optische, magnetische, Festkörper- und/oder andere nicht-flüchtige Medien aufweisen. Das Programm kann derart beschaffen sein, dass es die hier beschriebenen Verfahren verkörpert bzw. auszuführen imstande ist, sodass die Verarbeitungseinheit die Schritte solcher Verfahren ausführen kann und damit insbesondere mit dem Roboter die vorgegebene Anordnung abfahren bzw. den Roboter (hierzu) betreiben bzw. steuern kann. Ein Computerprogrammprodukt kann in einer Ausführung ein, insbesondere nicht-flüchtiges, Speichermedium zum Speichern eines Programms bzw. mit einem darauf gespeicherten Programm aufweisen, insbesondere sein, wobei ein Ausführen dieses Programms ein System bzw. eine Steuerung, insbesondere einen Computer, dazu veranlasst, ein hier beschriebenes Verfahren bzw. einen oder mehrere seiner Schritte auszuführen.

**[0040]** In einer Ausführung werden ein oder mehrere, insbesondere alle, Schritte des Verfahrens vollständig oder teilweise automatisiert durchgeführt, insbesondere durch das System bzw. sein(e) Mittel.

**[0041]** In einer Ausführung weist das System den Roboter auf.

**[0042]** Weitere Vorteile und Merkmale ergeben sich aus den Unteransprüchen und den Ausführungsbeispielen. Hierzu zeigt, teilweise schematisiert:

**Fig. 1:** einen mobilen Roboter beim Abfahren einer vorgegebenen Anordnung von Wegen nach einer Ausführung der vorliegenden Erfindung; und

**Fig. 2:** ein Verfahren zum Abfahren der vorgegebenen Anordnung von Wegen mit dem mobilen Roboter nach einer Ausführung der vorliegenden Erfindung.

**[0043]** **Fig. 1** zeigt eine vorgegebene Anordnung von Wegen, die in Knoten **K1 - K10** miteinander verbunden sind, sowie einen autonomen mobilen Roboter **1** mit einer Steuerung **2**.

**[0044]** Durch Abfahren aller Wege der vorgegebenen Anordnung können insbesondere ein Explorationspfad für eine simultane Posenbestimmung und Kartenerstellung mit dem Roboter **1** vorgegeben und dabei a priori Umweltinformationen genutzt bzw. berücksichtigt werden.

**[0045]** Für die Wege sind jeweils Kosten  $c$  vorgegeben, für die in **Fig. 1** exemplarisch Werte angegeben sind, beispielsweise Kosten von 10 Einheiten für den Weg zwischen den Knoten **K1** und **K2** ( $c_{1,2}=10$ ). Diese Kosten können beispielsweise von der Länge des Weges, der zu seinem Abfahren vom Roboter **1** benötigten Zeit oder dergleichen abhängen, diese insbesondere angeben bzw. sein.

**[0046]** In einem ersten Schritt **S10** (vgl. **Fig. 2**) wurde mittels eines CPP-Lösungsverfahrens eine (erste) Ausgangs-Route ermittelt, die, beginnen an Knoten **K1**, alle Wege wenigstens einmal enthält und dabei einen (Gesamt)Aufwand, der gleich der Summe aller Kosten  $c_{i,j}$  aller dabei abgefahrenen Wege ist, minimiert.

**[0047]** Im Ausführungsbeispiel ergab sich dabei die (erste bzw. initiale) Ausgangs-Route  $K1 \rightarrow K2 \rightarrow K3 \rightarrow K4 \rightarrow K5 \rightarrow K4 \rightarrow K7 \rightarrow K10 \rightarrow K9 \rightarrow K8 \rightarrow K3 \rightarrow K8 \rightarrow K7 \rightarrow K6 \rightarrow K5 \rightarrow K1$ .

**[0048]** Roboter **1** hat beim Abfahren dieser Ausgangs-Route **K1** aktuell Knoten **K7** angefahren. Für diesen ermittelt die Steuerung **2** in einem Schritt **S20** die aktuelle Lokalisierungsunsicherheit des Roboters, beispielsweise in Form des auf den Bereich  $[0; 1]$  normierten Betrags bzw. der Summe  $K$  der Hauptdiagonalen der Kovarianz-Matrix der Pose des Roboters **1** in seiner Umgebung.

**[0049]** Übersteigt dieser Wert, wie im Ausführungsbeispiel für den aktuellen Knoten **K7** (erstmal) einen vorgegebenen Schwellwert, da beispielsweise aufgrund der Weglänge bis zu diesem Knoten ohne eine Schleifen-Route die Lokalisierungsunsicherheit zu groß geworden ist, ermittelt die Steuerung **2** in einem Schritt **S30** eine (aktuelle) Ausgangs-Route, die diesen Knoten mit dem Zielknoten **K1** verbindet und alle bisher noch nicht abgefahrenen Wege enthält, im Ausführungsbeispiel verwendet sie den Rest der o.g. (ersten) Ausgangs-Route ( $K7 \rightarrow K10 \rightarrow K9 \rightarrow K8 \rightarrow K3 \rightarrow K8 \rightarrow K7 \rightarrow K6 \rightarrow K5 \rightarrow K1$ ).

**[0050]** Es ist ersichtlich, dass hierbei kein Weg nach Durchfahren dieses Weges und wenigstens eines weiteren Weges erneut durchfahren wird, die aktuelle Ausgangs-Route also keine Schleifen-Route aufweist.

**[0051]** Die Steuerung 2 ermittelt zusätzlich in Schritt **S30** mögliche Ersatz-Routen, die jeweils wenigstens einen Weg nach Durchfahren dieses Weges und wenigstens eines weiteren Weges erneut durchfahren.

**[0052]** Dazu blendet sie die drei zuletzt abgefahrenen Wege **K3 - K4**, **K4 - K5** und **K4 - K7** aus und stellt für die bereits angefahrenen Knoten **K3** und **K5** fest, dass diese auch dann bzw. bei ausgeblendeten Wegen **K3 - K4**, **K4 - K5** und **K4 - K7** von der aktuellen Knoten **K7** aus angefahren werden können, während dies für **K4** nicht der Fall ist (auf diese Weise wird ein triviales Zurückfahren  $K7 \rightarrow K4$  vermieden).

**[0053]** Für diese Knoten **K3** und **K5** wird - mit nun wieder eingeblendeten Wege **K3 - K4**, **K4 - K5** und **K4 - K7** - in Schritt **S30** mittels eines offenen und/oder selektiven CPP-Lösungsverfahrens („Open Rural Chinese Postman Problem“) jeweils eine Schleifen-Route, welche wenigstens einen Weg nach Durchfahren dieses Weges und wenigstens eines weiteren Weges erneut durchfährt, und eine daran anschließende Rest-Route ermittelt, die alle dann noch nicht abgefahrenen Wege enthält und zu dem Zielknoten **K1** zurückführt.

**[0054]** Für die aktuelle Ausgangs-Route und Ersatz-Routen, die sich jeweils aus einer der Schleifen-Routen und der daran anschließenden Rest-Route zusammensetzen, wird in einem Schritt **S40** jeweils der Wert einer Gütefunktion  $G$  ermittelt.

**[0055]** Dazu wird in Schritt **S40** jeweils ein erster Aufwand als kleinerer von einem minimalen Aufwand für eine Schleifen-Route, welche wenigstens einen Weg nach Durchfahren dieses Weges und wenigstens eines weiteren Weges erneut durchfährt, und einem minimalen Aufwand für eine Ziel-Route ist, die alle noch nicht abgefahrenen Wege enthält, sowie ein zweiter Aufwand ermittelt, der ein minimaler Aufwand für eine Rest-Route ist, die alle nach dieser Schleifen-Route noch nicht abgefahrenen Wege enthält:

aktuelle Ausgangs-Route:

$K7 \rightarrow K10 \rightarrow K9 \rightarrow K8 \rightarrow K3 \rightarrow K8 \rightarrow K7 \rightarrow K6 \rightarrow K5 \rightarrow K1$

$$\begin{aligned} \text{erster Aufwand } C_{1,A} &= C_{7-10} + C_{10-9} + C_{9-8} + C_{8+3} + C_{3-8} + C_{8-7} + C_{7-6} + C_{6-5} + C_{5-1} \\ \text{(Ziel-Route)} &= 3 + 5 + 3 + 5 + 5 + 5 + 5 + 5 + 4 \\ &= 40 \end{aligned}$$

$$\text{zweiter Aufwand } C_{2,A} = 0$$

Ersatz-Route mit **K5** bzw. Weg 4 - 5:

Schleifen-Route:  $K7 \rightarrow K6 \rightarrow K5 \rightarrow K4$

$$\begin{aligned} \text{erster Aufwand } C_{1,E1} &= C_{7-6} + C_{6-5} + C_{5-4} \\ &= 5 + 5 + 5 \\ &= 15 \end{aligned}$$

Rest - Route:

$K4 \rightarrow K7 \rightarrow K10 \rightarrow K9 \rightarrow K8 \rightarrow K3 \rightarrow K8 \rightarrow K7 \rightarrow K4 \rightarrow K5 \rightarrow K1$

$$\begin{aligned} \text{zweiter Aufwand } C_{2,E2} &= C_{4-7} + C_{7-10} + C_{10-9} + C_{9-8} + \\ &+ C_{8-3} + C_{3-8} + C_{8-7} + C_{7-4} + C_{4-5} + C_{5-1} \\ &= 5 + 3 + 5 + 3 + 5 + 5 + 5 + 5 + 5 + 4 \\ &= 45 \end{aligned}$$

Ersatz-Route mit **K3** bzw. Weg 3 - 4:

Schleifen-Route:  $K7 \rightarrow K8 \rightarrow K3 \rightarrow K4$

$$\begin{aligned} \text{erster Aufwand } C_{1,E2} &= C_{7-8} + C_{8-3} + C_{3-4} \\ &= 5 + 5 + 5 \\ &= 15 \end{aligned}$$

Rest-Route:

$K4 \rightarrow K7 \rightarrow K10 \rightarrow K9 \rightarrow K8 \rightarrow K7 \rightarrow K6 \rightarrow K5 \rightarrow K1$

$$\begin{aligned}
\text{zweiter Aufwand } C_{2,E2} &= C_{4-7} + C_{7-10} + C_{10-9} + C_{9-8} + \\
&+ C_{8-7} + C_{7-6} + C_{6-5} + C_{5-1} \\
&= 5 + 3 + 5 + 3 + 5 + 5 + 5 + 4 \\
&= 35
\end{aligned}$$

**[0056]** Dann wird in Schritt **S40** für jede der Routen der Wert des Gütekriteriums  $C_E = C_1 + K \cdot C_2$  ermittelt:

aktuelle Ausgangs-Route:	$C_{E,A} = C_{1,A} + K C_{2,A}$
Ersatz-Route mit K5 bzw. Weg 5 - 4:	$C_{E,E1} = C_{1,E1} + K \cdot C_{2,E1}$
Ersatz-Route mit K3 bzw. Weg 3 - 4:	$C_{E,E2} = C_{1,E2} + K \cdot C_{2,E2}$

**[0057]** Ist beispielsweise der Roboter **1** am Knoten **7** (noch bzw. wieder) perfekt lokalisiert, ist seine Lokalisierungsunsicherheit bzw. die variable Gewichtung des zweiten Aufwands  $C_2$  gleich 1:

aktuelle Ausgangs-Route:	$C_{E,A} = 40 + 1 \cdot 0$ = 40
--------------------------	------------------------------------

Ersatz-Route mit K5 bzw. Weg 5 - 4:	$C_{E,E1} = 15 + 1 \cdot 45$ = 60
-------------------------------------	--------------------------------------

Ersatz-Route mit K3 bzw. Weg 3 - 4:	$C_{E,E2} = 15 + 1 \cdot 35$ = 50
-------------------------------------	--------------------------------------

**[0058]** Da der Wert der Gütefunktion für die Ausgangs-Route kleiner als der Wert für die Ersatz-Routen ist (S50: „N“), wechselt der Roboter **1** nicht, sondern fährt die aktuelle Ausgangs-Route weiter ab.

**[0059]** Ist umgekehrt der Roboter **1** am Knoten **7** maximal unsicher lokalisiert, ist seine Lokalisierungsunsicherheit bzw. die variable Gewichtung des zweiten Aufwands  $C_2$  gleich 0:

aktuelle Ausgangs-Route:	$C_{E,A} = 40 + 0 \cdot 0$ = 40
--------------------------	------------------------------------

Ersatz-Route mit K5 bzw. Weg 5 - 4:	$C_{E,E1} = 15 + 0 \cdot 45$ = 15
-------------------------------------	--------------------------------------

Ersatz-Route mit K3 bzw. Weg 3 - 4:	$C_{E,E2} = 15 + 0 \cdot 35$ = 15
-------------------------------------	--------------------------------------

**[0060]** Da nun der Aufwand für die Rest-Route nicht mehr ins Gewicht fällt und dadurch der Wert der Gütefunktion für die Ersatz-Routen kleiner als der Wert für die Ausgangs-Route ist (S50: „Y“), wechselt der Roboter **1** nun wunschgemäß zur (günstigeren) Ersatz-Route (**S60**), wobei in diesem Extremfall mit  $K = 0$  beide Ersatzrouten gleich gut erscheinen, bei geringfügiger Berücksichtigung der Rest-Route die Ersatz-Route mit K3 bzw. Weg 3 - 4 günstiger ist und ausgewählt wird.



**[0061]** Obwohl in der vorhergehenden Beschreibung exemplarische Ausführungen erläutert wurden, sei darauf hingewiesen, dass eine Vielzahl von Abwandlungen möglich ist. Außerdem sei darauf hingewiesen, dass es sich bei den exemplarischen Ausführungen lediglich um Beispiele handelt, die den Schutzbereich, die Anwendungen und den Aufbau in keiner Weise einschränken sollen. Vielmehr wird dem Fachmann durch die vorausgehende Beschreibung ein Leitfaden für die Umsetzung von mindestens einer exemplarischen Ausführung gegeben, wobei diverse Änderungen, insbesondere in Hinblick auf die Funktion und Anordnung der beschriebenen Bestandteile, vorgenommen werden können, ohne den Schutzbereich zu verlassen, wie er sich aus den Ansprüchen und diesen äquivalenten Merkmalskombinationen ergibt.

#### Bezugszeichenliste

1	mobiler Roboter
2	Steuerung
K1,...,K10	Knoten
K1 - K2,	
K2 - K3,...	
K1 - K5,	Weg

#### Patentansprüche

1. Verfahren zum Abfahren einer vorgegebenen Anordnung von Wegen (K1 - K2, K2 - K3, K1 - K5), die in Knoten (K1,...,K10) miteinander verbunden sind, mit einem mobilen, insbesondere autonomen, Roboter (1), wobei der Roboter von einer Ausgangs-Route, die alle noch nicht abgefahrenen Wege enthält, zu einer hiervon verschiedenen Ersatz-Route wechselt (S60), die eine Schleifen-Route, welche wenigstens einen Weg nach Durchfahren dieses Weges und wenigstens eines weiteren Weges erneut durchfährt, und eine daran anschließende Rest-Route aufweist, die alle dann noch nicht abgefahrenen Wege enthält, falls ein Wert einer Gütefunktion für die Ersatz-Route kleiner als ein Wert dieser Gütefunktion für die Ausgangs-Route ist, wobei die Gütefunktion von einem ersten Aufwand, einem zweiten Aufwand und einer variablen Gewichtung des ersten und zweiten Wertes zueinander abhängt; wobei der erste Aufwand der kleinere von einem minimalen Aufwand für eine Schleifen-Route, welche wenigstens einen Weg nach Durchfahren dieses Weges und wenigstens eines weiteren Weges erneut durchfährt, und einem minimalen Aufwand für eine Ziel-Route, die alle noch nicht abgefahrenen Wege enthält; und der zweite Aufwand ein minimaler Aufwand für eine Rest-Route ist, die alle nach dieser Schleifen-Route noch nicht abgefahrenen Wege enthält; und die variable Gewichtung den zweiten Aufwand für eine erste Lokalisierungsunsicherheit des Roboters niedriger gewichtet als für eine kleinere zweite Lokalisierungsunsicherheit des Roboters, insbesondere für eine minimale Lokalisierungsunsicherheit des Roboters maximal, insbesondere gleich dem ersten Aufwand, gewichtet und/oder für eine maximale Lokalisierungsunsicherheit des Roboters minimal gewichtet, insbesondere ausblendet.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Roboter von der Ausgangs-Route zu derjenigen von mehreren Ersatz-Routen wechselt, für die der Wert der Gütefunktion am kleinsten ist.

3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass wenigstens eine Pose des Roboters in seiner Umgebung bestimmt wird.

4. Verfahren nach dem vorhergehenden Anspruch, **dadurch gekennzeichnet**, dass auf Basis dieser Pose eine Karte der Umgebung erstellt wird.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Aufwand einer Route von ihrer Länge und/oder der zum Abfahren mit dem Roboter erforderlichen Zeit und/oder Energie abhängt.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Lokalisierungsunsicherheit des Roboters von einer Länge einer bisher abgefahrenen Route, einer Anzahl dabei durchgeführter Schleifen-Routen und/oder einer Bestimmung wenigstens einer Pose des Roboters in seiner Umgebung abhängt.

7. System zum Abfahren einer vorgegebenen Anordnung von Wegen, die in Knoten miteinander verbunden sind, mit einem mobilen, insbesondere autonomen, Roboter (1), wobei das System zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der vorhergehenden Ansprüche eingerichtet ist und/oder aufweist:

Mittel (2) zum Kommandieren eines Wechsels des Roboters von einer Ausgangs-Route, die alle noch nicht abgefahrenen Wege enthält,

zu einer hiervon verschiedenen Ersatz-Route,

die eine Schleifen-Route, welche wenigstens einen Weg nach Durchfahren dieses Weges und wenigstens eines weiteren Weges erneut durchfährt, und

eine daran anschließende Rest-Route aufweist, die alle dann noch nicht abgefahrenen Wege enthält,

falls ein Wert einer Gütefunktion für die Ersatz-Route kleiner als ein Wert dieser Gütefunktion für die Ausgangs-Route ist,

wobei die Gütefunktion von einem ersten Aufwand, einem zweiten Aufwand und

einer variablen Gewichtung des ersten und zweiten Wertes zueinander abhängt; wobei der erste Aufwand der kleinere von

einem minimalen Aufwand für eine Schleifen-Route, welche wenigstens einen Weg nach Durchfahren dieses Weges und wenigstens eines weiteren Weges erneut durchfährt, und

einem minimalen Aufwand für eine Ziel-Route, die alle noch nicht abgefahrenen Wege enthält; und

der zweite Aufwand ein minimaler Aufwand für eine Rest-Route ist, die alle nach dieser Schleifen-Route noch nicht abgefahrenen Wege enthält; und

die variable Gewichtung den zweiten Aufwand für eine erste Lokalisierungsunsicherheit des Roboters niedriger gewichtet als für eine kleinere zweite Lokalisierungsunsicherheit des Roboters, insbesondere für eine minimale Lokalisierungsunsicherheit des Roboters maximal, insbesondere gleich dem ersten Aufwand, gewichtet und/oder für eine maximale Lokalisierungsunsicherheit des Roboters minimal gewichtet, insbesondere ausblendet.

8. Computerprogrammprodukt mit einem Programmcode, der auf einem von einem Computer lesbaren Medium gespeichert ist, zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 6.

Es folgt eine Seite Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

1

Fig. 1

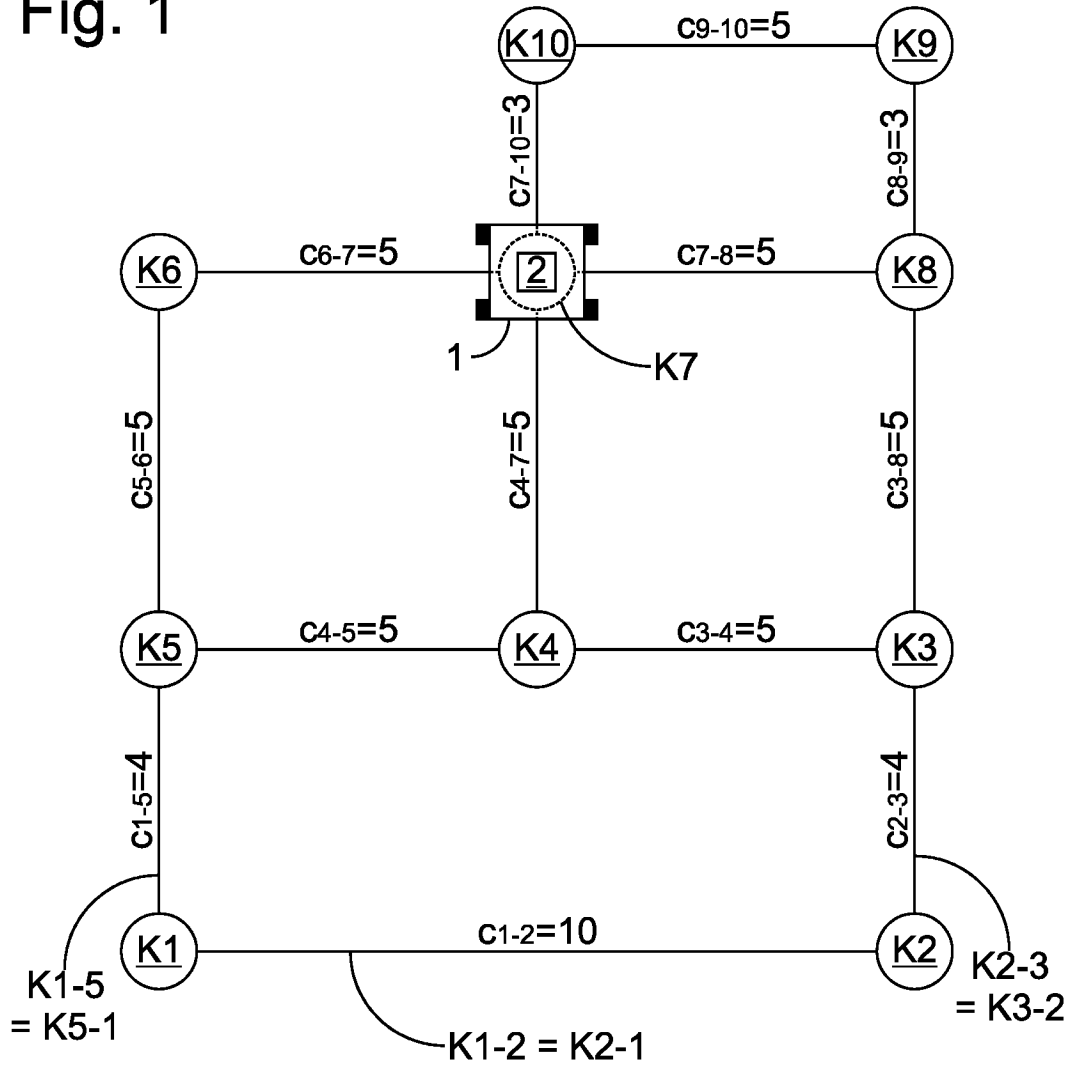


Fig. 2

