



(10) **DE 10 2020 105 655 B4** 2021.04.22

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2020 105 655.9**
(22) Anmeldetag: **03.03.2020**
(43) Offenlegungstag: **10.09.2020**
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **22.04.2021**

(51) Int Cl.: **B25J 13/08 (2006.01)**
B25J 9/16 (2006.01)

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

(30) Unionspriorität:
16/295,940 07.03.2019 US

(73) Patentinhaber:
Mujin, Inc., Tokyo, JP

(74) Vertreter:
**Hofstetter, Schurack & Partner - Patent- und
Rechtsanwaltskanzlei, PartG mbB, 81541
München, DE**

(72) Erfinder:
**Islam, Russell, Tokyo, JP; Ye, Xutao, Tokyo, JP;
Diankov, Rosen, Tokyo, JP**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

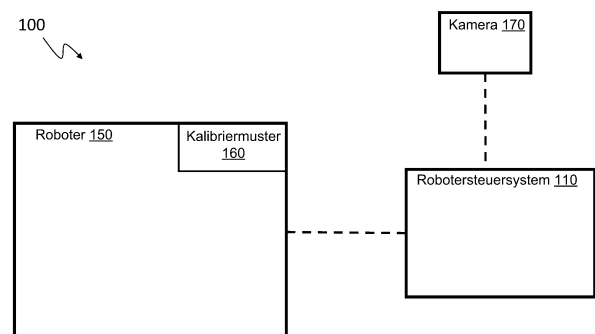
DE	101 64 944	B4
DE	11 2011 101 730	B4
DE	10 2017 217 142	A1
DE	10 2018 200 154	A1
US	10 052 766	B2
US	2015 / 0 025 683	A1

**ZHANG, Zhengyou: A flexible new technique
for camera calibration. 02-12-1998. 22 S. URL:
[https://www.microsoft.com/en-us/research/wp-
content/uploads/2016/02/tr98-71.pdf](https://www.microsoft.com/en-us/research/wp-content/uploads/2016/02/tr98-71.pdf) [abgerufen
am 06.11.2018]. - Technical Report MSR-TR-98-71**

(54) Bezeichnung: **Verfahren und System zum Durchführen einer automatischen Kamerakalibrierung zur
Robotersteuerung**

(57) Hauptanspruch: Robotersteuersystem (110), umfassend:
eine Kommunikationsschnittstelle (113), die konfiguriert ist, mit einem Roboter (150, 250, 350, 450) und mit einer Kamera (170, 180, 270, 370, 370A, 470) mit einem Kamerasichtfeld zu kommunizieren, wobei der Roboter (150, 250, 350, 450) eine Basis und einen Roboterarm mit einem darauf angeordneten Kalibriermuster (160, 260, 360, 460) aufweist; und
eine Steuerschaltung (111), die konfiguriert ist, eine Kamerakalibrierung auszuführen durch:
Bestimmen aller Eckorte eines imaginären Würfels, der in das Kamerasichtfeld passt,
Bestimmen mehrerer Orte, die an oder überall in dem imaginären Würfel verteilt sind,
Steuern des Roboterarms, um das Kalibriermuster (160, 260, 360, 460) zu den mehreren Orten zu bewegen, die an oder überall in dem imaginären Würfel verteilt sind, durch Ausgeben von Bewegungsbefehlen an den Roboter (150, 250, 350, 450) über die Kommunikationsschnittstelle (113), Empfangen mehrerer Kalibrierbilder von der Kamera (170, 180, 270, 370, 370A, 470) über die Kommunikationsschnittstelle (113), wobei die mehreren Kalibrierbilder durch die Kamera (170, 180, 270, 370, 370A, 470) erfasst werden und entsprechende Bilder des Kalibriermusters (160, 260, 360, 460) an den mehreren Orten sind,

Bestimmen entsprechender Abschätzungen von intrinsischen Kameraparametern basierend auf den mehreren Kalibrierbildern und
Bestimmen basierend auf den entsprechenden Abschätzungen der intrinsischen Kameraparameter: einer Abschätzung ...



Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren und ein System zum Durchführen einer automatischen Kamerakalibrierung zur Robotersteuerung.

[0002] Während Automatisierung üblicher wird, werden Roboter in mehr Umgebungen, wie beispielsweise in Lagerhaltungs- und Fertigungsumgebungen, verwendet. Roboter können zum Beispiel verwendet werden, um in einem Warenlager Elemente auf eine Palette zu laden oder davon zu entladen oder Gegenstände von einem Förderband in einem Werk aufzunehmen. Die Bewegung des Roboters kann fest vorgegeben sein oder kann auf einer Eingabe wie einem Bild, das durch eine Kamera in dem Warenlager oder dem Werk aufgenommen wird, basieren. Bei der letzteren Situation kann eine Kalibrierung ausgeführt werden, um eine Eigenschaft der Kamera zu bestimmen und eine Beziehung zwischen der Kamera und einer Umgebung zu bestimmen, in der sich der Roboter befindet. Die Kalibrierung kann als Kamerakalibrierung bezeichnet werden und kann Kalibrierinformationen erzeugen, die verwendet werden, um den Roboter basierend auf durch die Kamera erfasste Bilder zu steuern. Bei einigen Implementierungen kann die Kamerakalibrierung einen Handbetrieb durch eine Person einbeziehen, die Bewegungen des Roboters oder die Kamera manuell steuern kann, um ein Bild des Roboters zu erfassen. Aus der DE 10 2018 200 154 A1 ist eine Kalibration eines visuellen Sensors, insbesondere eine Kalibrationsvorrichtung, ein Kalibrationsverfahren und ein Programm zum Messen eines Bereichs, in welchem eine Zielmarkierung während einer Umsetzung einer Kalibration unter Verwendung einer Stereokamera mit mehreren Kameras detektiert wird, bekannt. Die DE 10 2017 217 142 A1 offenbart Maschinenvisionssysteme und bezieht sich auf die Kalibrierung von Maschinenvisionssystemen durch eine gleichzeitige Verfeinerung der kinematischen Kette der Roboter-/Bewegungsbühnen- und der Hand-Augen-Kalibrierungsparameter. Die DE 11 2011 101 730 B4 bezieht sich auf die Kalibrierung eines Bildverarbeitungssystems und insbesondere auf ein System und ein Verfahren zur Kalibrierung zwischen einem Bildverarbeitungssystem und einem Roboter. Die DE 101 64 944 B4 offenbart eine Vorrichtung und ein Verfahren zur Korrektur der Bewegung von Greif- oder Bearbeitungswerkzeugen relativ zu Gegenständen in unbekannter oder ungenauer Lage, insbesondere mittels Robotern. Aus der US 10 052 766 B2 sind verschiedene Technologien bekannt, die sich auf die automatische In-Situ-Kalibrierung und Registrierung eines Tiefensensors und eines Roboterarms beziehen, wobei der Tiefensensor und der Roboterarm in einem gemeinsamen Arbeitsbereich arbeiten. Die US 2015 / 0 025 683 A1 betrifft ein Robotersystem, bei dem ein visueller Sensor, wie z. B. eine Kamera, eine Position eines Werkstücks misst, um eine Betriebsposition eines Roboterkörpers zu korrigieren, und ein Kalibrierungsverfahren des Robotersystems zum Kalibrieren des Robotersystems.

[0003] Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, ein Robotersteuersystem, ein Verfahren zum Ausführen eines Robotersteuersystems und ein nicht flüchtiges computerlesbares Medium bereitzustellen, welche Kalibrierinformationen erzeugen, die eine Fähigkeit des Robotersteuersystems erleichtern, einen Roboter basierend auf durch eine Kamera erfasste Bilder zu steuern.

[0004] Gelöst werden diese Aufgaben durch ein Robotersteuersystem mit den Merkmalen des Anspruchs 1, ein Verfahren zum Ausführen eines Robotersteuersystems mit den Merkmalen des Anspruchs 13 und ein nicht flüchtiges computerlesbares Medium mit den Merkmalen des Anspruchs 16. Vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung sind in den jeweiligen Unteransprüchen angegeben.

[0005] Ein Aspekt der Ausführungsformen hierin betrifft das Ausführen einer automatischen Kamerakalibrierung zur Robotersteuerung. Die automatische Kamerakalibrierung kann durch ein Robotersteuersystem ausgeführt werden, das eine Kommunikationsschnittstelle und eine Steuerschaltung umfasst. Die Kommunikationsschnittstelle kann konfiguriert sein, mit einem Roboter und mit einer Kamera mit einem Kamerasichtfeld zu kommunizieren, wobei der Roboter eine Basis und einen Roboterarm mit einem darauf angeordneten Kalibriermuster aufweisen kann. Die Steuerschaltung des Robotersteuersystems kann konfiguriert sein, eine Kamerakalibrierung auszuführen durch: a) Bestimmen aller Eckorte eines imaginären Würfels, der in das Kamerasichtfeld passt, b) Bestimmen mehrerer Orte, die an oder überall in dem imaginären Würfel verteilt sind, c) Steuern des Roboterarms durch Ausgeben von Bewegungsbefehlen an den Roboter über die Kommunikationsschnittstelle, um das Kalibriermuster zu den mehreren Orten zu bewegen, die an oder überall in dem imaginären Würfel verteilt sind, d) Empfangen mehrerer Kalibrierbilder von der Kamera über die Kommunikationsschnittstelle, wobei die mehreren Kalibrierbilder durch die Kamera erfasst werden und entsprechende Bilder des Kalibrierpatterns an den mehreren Orten sind, e) Bestimmen entsprechender Abschätzungen von intrinsischen Kameraparametern basierend auf den mehreren Kalibrierbildern und f) Bestimmen, basierend auf den entsprechenden Abschätzungen der intrinsischen Kameraparameter: einer Abschätzung einer Transformationsfunktion, die eine Beziehung zwischen einem Kamerakoordinatensystem und einem Weltkoordinatensystem beschreibt, wobei das Kamerakoordinatensystem ein Koordinatensystem ist, das in Bezug auf einen Ort

und eine Ausrichtung der Kamera definiert ist, und das Weltkoordinatensystem ein Koordinatensystem ist, das in Bezug auf einen Ort definiert ist, der relativ zu der Basis des Roboters stationär ist. Die Steuerschaltung kann ferner konfiguriert sein, nachdem die Kamerakalibrierung ausgeführt wurde, ein anschließendes Bild von der Kamera über die Kommunikationsschnittstelle zu empfangen und eine Platzierung des Roboterarms durch Ausgeben eines anschließenden Bewegungsbefehls, der auf dem anschließenden Bild und auf der Abschätzung der Transformationsfunktion basiert, über die Kommunikationsschnittstelle an den Roboter zu steuern. Bei einer Ausführungsform kann das Robotersteuersystem ein nicht flüchtiges computerlesbares Medium aufweisen, auf dem Befehle gespeichert sind, die bei Ausführung durch die Steuerschaltung bewirken, dass die Steuerschaltung die vorstehenden Schritte ausführt.

[0006] Ein Aspekt der Ausführungsformen betrifft zudem das Ausführen einer automatischen Kamerakalibrierung zur Robotersteuerung. Die automatische Kamerakalibrierung kann durch ein Robotersteuersystem ausgeführt werden, das eine Kommunikationsschnittstelle und eine Steuerschaltung umfasst. Die Kommunikationsschnittstelle kann zum Kommunizieren konfiguriert sein mit: einem Roboter mit einer Basis und einem Roboterarm mit einem darauf angeordneten Kalibriermuster und einer Kamera mit einem Kamerasichtfeld. Das Kalibriermuster kann mehrere Musterelemente mit entsprechenden definierten Musterelementorten in einem Musterkoordinatensystem umfassen, wobei das Musterkoordinatensystem ein Koordinatensystem ist, das in Bezug auf einen Ort und eine Ausrichtung des Kalibrierusters definiert ist. Die Steuerschaltung kann konfiguriert sein, eine Kamerakalibrierung auszuführen durch: a) Steuern des Roboterarms durch Ausgeben eines Bewegungsbefehls über die Kommunikationsschnittstelle an den Roboter, um das Kalibriermuster zu mindestens einem Ort innerhalb des Kamerasichtfelds zu bewegen, b) Empfangen eines Kalibrierbildes von der Kamera über die Kommunikationsschnittstelle, wobei das Kalibrierbild durch die Kamera erfasst wird und ein Bild des Kalibrierusters an dem mindestens einen Ort ist, c) Bestimmen mehrerer Bildmuster-elementorte, die entsprechende Orte anzeigen, an denen die mehreren Musterelemente im Kalibrierbild erscheinen, d) Bestimmen einer ersten Abschätzung eines ersten intrinsischen Kameraparameters basierend auf den mehreren Bildmuster-elementorten und basierend auf den definierten Musterelementorten, e) Bestimmen einer ersten Abschätzung eines zweiten intrinsischen Kameraparameters basierend auf der ersten Abschätzung des ersten intrinsischen Kameraparameters und basierend auf den mehreren Bildmuster-elementorten, nachdem die erste Abschätzung des ersten intrinsischen Kameraparameters bestimmt wurde, f) Bestimmen einer zweiten Abschätzung des ersten intrinsischen Kameraparameters und einer zweiten Abschätzung des zweiten intrinsischen Kameraparameters basierend auf der ersten Abschätzung des zweiten intrinsischen Kameraparameters und basierend auf den mehreren Musterelementorten und den definierten Musterelementorten und g) Bestimmen, basierend auf der zweiten Abschätzung des ersten intrinsischen Kameraparameters und der zweiten Abschätzung des zweiten intrinsischen Kameraparameters, einer Abschätzung einer Transformationsfunktion, die eine Beziehung zwischen einem Kamerakoordinatensystem und einem Weltkoordinatensystem beschreibt, wobei das Kamerakoordinatensystem ein Koordinatensystem ist, das in Bezug auf einen Ort und eine Ausrichtung der Kamera definiert ist, und das Weltkoordinatensystem ein Koordinatensystem ist, das in Bezug auf einen Ort definiert ist, der relativ zu der Basis des Roboters stationär ist. Die Steuerschaltung kann ferner konfiguriert sein, nachdem die Kamerakalibrierung ausgeführt ist, ein anschließendes Bild von der Kamera zu empfangen und eine Platzierung des Roboterarms durch Ausgeben eines anschließenden Bewegungsbefehls an den Roboter, der auf dem anschließenden Bild und auf der Abschätzung der Transformationsfunktion basiert, zu steuern.

[0007] Die vorstehenden und andere Merkmale, Aufgaben und Vorteile der Erfindung werden aus der folgenden Beschreibung von Ausführungsformen, wie sie in den begleitenden Zeichnungen veranschaulicht sind, offensichtlich. Die begleitenden Zeichnungen, die hierin eingeschlossen sind und einen Teil der Beschreibung bilden, dienen ferner dazu, die Prinzipien der Ausführungsformen zu erklären und einen Fachmann auf dem Gebiet in die Lage zu versetzen, die Ausführungsformen herzustellen und zu verwenden. Die Zeichnungen sind nicht maßstäblich.

Die **Fig. 1A** und **Fig. 1B** stellen Blockdiagramme von Systemen dar, bei denen eine Kamerakalibrierung gemäß Ausführungsformen hierin ausgeführt wird.

Fig. 1C stellt ein Blockdiagramm eines Robotersteuersystems dar, das konfiguriert ist, eine Kamerakalibrierung gemäß einer Ausführungsform hierin auszuführen.

Fig. 2A stellt ein System dar, das einen Roboter veranschaulicht, der gemäß einer Ausführungsform hierin basierend auf Kalibrierinformationen, die von der Kamerakalibrierung erlangt sind, gesteuert wird.

Fig. 2B stellt ein Beispiel von Kalibrierinformationen dar, die durch eine intrinsische Kalibrierphase und eine Hand-Auge-Kalibrierphase der Kamerakalibrierung gemäß einer Ausführungsform hierin erlangt sind.

Fig. 3A stellt ein Modell einer Kamera dar, das in eine Kamerakalibrierung gemäß einer Ausführungsform hierin einbezogen ist.

Die **Fig. 3B** und **Fig. 3C** stellen Koordinatensysteme dar, die in das Ausführen einer Kamerakalibrierung gemäß einer Ausführungsform hierin einbezogen sind.

Fig. 4 stellt ein Ablaufdiagramm bereit, das ein Verfahren zum Bestimmen von Orten, an denen ein Kalibriermuster innerhalb eines Sichtfelds einer Kamera (das auch als ein Kameranichtfeld bezeichnet wird) anzuordnen ist, und zum Erfassen entsprechender Bilder des Kalibrierusters an den bestimmten Orten gemäß einer Ausführungsform hierin veranschaulicht.

Die **Fig. 5A** und **Fig. 5B** veranschaulichen ein beispielhaftes System, bei dem ein Roboterarm gemäß einer Ausführungsform hierin ein Kalibriermuster an verschiedenen Orten innerhalb eines Sichtfelds einer Kamera anordnet.

Die **Fig. 5C** bis **Fig. 5F** veranschaulichen imaginäre Würfel, die gemäß Ausführungsformen hierin verschiedene Orte umschließen, an denen ein Kalibriermuster angeordnet wird.

Die **Fig. 6A** bis **Fig. 6D** veranschaulichen gemäß einer Ausführungsform hierin beispielhafte Kalibrierbilder, die Bilder eines Kalibrierusters sind, das durch eine Kamera erfasst wird.

Fig. 7 veranschaulicht gemäß einer Ausführungsform hierin imaginäre Würfel, die in ein Sichtfeld einer Kamera passen.

Fig. 8A stellt ein beispielhaftes Kalibriermuster gemäß einer Ausführungsform hierin dar.

Fig. 8B stellt gemäß einer Ausführungsform hierin ein beispielhaftes Bild eines Kalibrierusters dar, bei dem das Bild einen Linsenverzerrungseffekt aufweist.

Die **Fig. 9A** und **Fig. 9B** stellen ein Ablaufdiagramm bereit, das ein Verfahren zum Ausführen einer Kamerakalibrierung gemäß einer Ausführungsform hierin veranschaulicht.

Die **Fig. 10A** und **Fig. 10B** veranschaulichen einen Aspekt des Bestimmens eines Krümmungsbetrags in einem Bild eines Kalibrierusters gemäß einer Ausführungsform hierin.

Die **Fig. 11A** und **Fig. 11B** stellen Diagramme bereit, die Beispiele einer intrinsischen Kalibrierphase der Kamerakalibrierung gemäß Ausführungsformen hierin veranschaulichen.

Fig. 12 stellt ein Diagramm bereit, das ein Beispiel einer Hand-Auge-Kalibrierphase der Kamerakalibrierung gemäß einer Ausführungsform hierin veranschaulicht.

[0008] Die folgende ausführliche Beschreibung ist ihrer Natur nach lediglich beispielhaft und beabsichtigt nicht, die Erfindung oder die Anmeldung und Verwendungen davon zu begrenzen. Weiterhin besteht keine Absicht, an eine ausdrückliche oder implizite Theorie gebunden zu sein, die in dem vorstehenden technischen Gebiet, dem allgemeinen Stand der Technik, der Kurzdarstellung oder in der folgenden detaillierten Beschreibung dargestellt ist.

[0009] Hierin beschriebene Ausführungsformen betreffen das Ausführen einer Kalibrierung einer Kamera, die verwendet wird, um einen Roboter zu steuern, wie beispielsweise einen Roboter, der in einem Warenlager, einem Produktionsbetrieb oder in einer anderen Umgebung verwendet wird. Die Kalibrierung kann als Kamerakalibrierung bezeichnet werden und kann durch, z. B. ein Robotersteuersystem (auch als Robotersteuerung bezeichnet) ausgeführt werden, um Kalibrierinformationen zu erzeugen, die eine Fähigkeit des Robotersteuersystems erleichtern, den Roboter basierend auf durch die Kamera erfasste Bilder zu steuern. Der Roboter kann zum Beispiel verwendet werden, um ein Paket in einem Warenlager aufzunehmen, wobei das Platzieren eines Arms oder einer anderen Komponente des Roboters auf durch die Kamera erfassten Bildern des Pakets basieren kann. In diesem Fall können die Kalibrierinformationen zusammen mit den Bildern des Paketes verwendet werden, um beispielsweise einen Ort und eine Ausrichtung des Pakets relativ zu dem Arm des Roboters zu bestimmen. Wie nachfolgend ausführlicher beschrieben, kann die Kamerakalibrierung das Bestimmen entsprechender Abschätzungen von intrinsischen Kameraparametern einer Kamera und das Bestimmen einer Abschätzung einer Beziehung zwischen der Kamera und ihrer äußeren Umgebung einbeziehen. Ein intrinsischer Kameraparameter kann sich auf einen intrinsischen Parameter einer Kamera beziehen und kann auch als ein interner Parameter einer Kamera bezeichnet werden und er kann einen Wert, d. h. beispielsweise eine Matrix, einen Vektor oder einen Skalarwert, aufweisen. Wie nachfolgend ausführlicher erörtert, umfassen Beispiele eines intrinsischen Kameraparameters eine Projektionsmatrix und einen Verzerrungsparameter, wobei eine Abschätzung des intrinsischen Kameraparameters auch als Schätzwert bezeichnet werden kann. Die Beziehung zwischen der Kamera und ihrer äußeren Umgebung kann in einigen Fällen als eine Transformati-

onsfunktion ausgedrückt werden und eine Abschätzung dieser Transformationsfunktion kann auch als Schätzfunktion bezeichnet werden. In einigen Fällen kann die Transformationsfunktion eine durch eine Matrix dargestellte lineare Transformation sein. In einigen Fällen kann die Kamerakalibrierung mithilfe eines Kalibrieramusters ausgeführt werden, das an definierten Orten angeordnete Musterelemente aufweisen kann. Die Kamera kann ein Bild der Musterelemente des Kalibrieramusters erfassen und die Kamerakalibrierung kann basierend auf dem Vergleichen eines Bildes der Musterelemente mit den definierten Orten der Musterelemente ausgeführt werden.

[0010] Ein Aspekt der Ausführungsformen hierin betrifft das Verbessern einer Genauigkeit der Kamerakalibrierung durch Bestimmen einer Abschätzung eines ersten intrinsischen Kameraparameters (z. B. Projektionsmatrix) in einer separaten Stufe als der zur Bestimmung einer Abschätzung eines zweiten intrinsischen Kameraparameters (z. B. Verzerrungsparameter) verwendeten. Der erste intrinsische Kameraparameter kann insbesondere in einer ersten Stufe abgeschätzt werden und die resultierende Abschätzung kann als eine Eingabe in eine zweite Stufe verwendet werden, bei der eine Abschätzung des zweiten intrinsischen Kameraparameters bestimmt wird. Mit dieser Herangehensweise kann die Abschätzung des ersten intrinsischen Kameraparameters während der zweiten Stufe als bekannt betrachtet werden, sodass die zweite Stufe hinsichtlich des Bestimmens der Abschätzung des zweiten intrinsischen Kameraparameters spezialisiert werden kann. Da die Abschätzung des ersten intrinsischen Kameraparameters als bekannt betrachtet wird, muss die zweite Stufe ferner keine entsprechenden Abschätzungen für alle intrinsischen Kameraparameter einer Kamera bestimmen, kann sich aber darauf konzentrieren, nur die Abschätzung des zweiten intrinsischen Kameraparameters zu bestimmen. Infolgedessen kann die zweite Stufe eine korrektere Abschätzung des zweiten intrinsischen Kameraparameters ergeben, der relativ zu einer Implementierung, bei der entsprechende Abschätzungen für alle intrinsischen Kameraparameter gleichzeitig in einer einzigen Stufe abgeschätzt und dann als eine Ausgabe einer intrinsischen Kalibrierung verwendet werden, gegenüber Kalibrierfehlern robuster ist.

[0011] Eine einzige Stufe kann durch zum Beispiel Erzeugen und Lösen eines Satzes von Gleichungssystemen, welche die intrinsischen Kameraparameter einbeziehen und die eine Beziehung zwischen einem Bild der Musterelemente und definierten Orten der Musterelemente des Kalibrieramusters beschreiben, beispielsweise gleichzeitig entsprechende Abschätzungen für alle intrinsischen Kameraparameter einer Kamera bestimmen. In einigen Fällen kann das Gleichungssystem eine Beziehung zwischen Orten in den erfassten Bildern (die auch als Kalibrierbilder bezeichnet werden können), an denen die Musterelemente erscheinen, und den definierten Orten der Musterelemente beschreiben. Die erfassten Kalibrierbilder von der Kamera können jedoch Bildrauschen umfassen, was eine Genauigkeit des Gleichungssystems reduzieren kann. Die entsprechenden Abschätzungen der intrinsischen Kameraparameter, die aus dem Gleichungssystem abgeleitet sind, können infolgedessen auch Genauigkeit einbüßen. Ferner kann eine entsprechende Abschätzung für jeden intrinsischen Kameraparameter des Gleichungssystems etwas an Genauigkeit opfern, um zu ermöglichen, dass das Gleichungssystem erfüllt wird. Diese einzelne Stufe kann dementsprechend Kalibrierfehler bei ihren Abschätzungen der intrinsischen Kameraparameter hervorrufen, die wiederum eine Fähigkeit beeinflussen können, den Arm des Roboters basierend auf durch die Kamera erfassten Bildern genau zu positionieren.

[0012] Bei einer Ausführungsform kann der Kalibrierfehler unter Verwendung von Mehrfachstufen zum Bestimmen entsprechender Abschätzungen für alle intrinsischen Kameraparameter der Kamera reduziert werden. Wie vorstehend angegeben, kann eine erste Stufe verwendet werden, um eine erste Abschätzung eines ersten intrinsischen Kameraparameters zu bestimmen, und eine zweite Stufe kann verwendet werden, um eine erste Abschätzung eines zweiten intrinsischen Kameraparameters zu bestimmen. In einigen Fällen kann die erste Stufe auch eine andere Abschätzung für den zweiten intrinsischen Kameraparameter erzeugen, aber die zweite Stufe kann diese Abschätzung von der ersten Stufe ignorieren und stattdessen ihre eigene Abschätzung für den zweiten intrinsischen Kameraparameter erzeugen. In einigen Fällen kann die zweite Stufe, anstatt eine Allzweckstufe zu sein, die entsprechende Abschätzungen für alle intrinsischen Kameraparameter bestimmt, eine Spezialstufe sein, die dem Bestimmen einer Abschätzung für nur den zweiten intrinsischen Kameraparameter zugeordnet ist. Die zweite Stufe kann infolgedessen eine korrektere Abschätzung für den zweiten intrinsischen Kameraparameter erzeugen.

[0013] Bei einer Ausführungsform können die Mehrfachstufen in einer pipelineartigen Weise verwendet werden, bei der wie vorstehend erwähnt ein Ergebnis der ersten Stufe als eine Eingabe in die zweite Stufe verwendet wird. Die zweite Stufe kann insbesondere basierend auf einer Abschätzung des ersten intrinsischen Kameraparameters der ersten Stufe eine Abschätzung für den zweiten intrinsischen Kameraparameter erzeugen. In einigen Fällen kann die Abschätzung des zweiten intrinsischen Kameraparameters der zweiten Stufe wiederum verwendet werden, die Abschätzung des ersten intrinsischen Kameraparameters zu verfeinern, was als eine dritte Stufe behandelt werden kann. In einigen Fällen kann die dritte Stufe auch die Abschätzung des

zweiten intrinsischen Kameraparameters verfeinern. Die Abschätzung des zweiten intrinsischen Kameraparameters der zweiten Stufe kann beispielsweise durch die dritte Stufe als eine fundierte anfängliche Schätzung bezüglich des zweiten intrinsischen Kameraparameters verwendet werden. Diese anfängliche Schätzung kann ein hohes Niveau an Genauigkeit aufweisen und kann daher die dritte Stufe unterstützen, die Abschätzungen des ersten intrinsischen Kameraparameters und des zweiten intrinsischen Kameraparameters weiter zu verbessern.

[0014] Bei einer Ausführungsform können die entsprechenden Abschätzungen der intrinsischen Kameraparameter in einer vierten Stufe weiter verfeinert werden, die eine Genauigkeit der Abschätzungen dadurch bewertet, dass sie diese zum Bestimmen simulierter Orte von entsprechenden Musterelementen verwendet. In einigen Fällen kann die vierte Stufe der dritten Stufe folgen. In anderen Fällen kann die vierte Stufe unmittelbar nach der zweiten Stufe ausgeführt werden und die vorstehend beschriebene dritte Stufe übersprungen werden. Wie nachfolgend ausführlicher beschrieben, kann ein simulierter Ort für ein Musterelement ein vorhergesagter Ort in einem Kalibrierbild sein, an dem basierend auf den Abschätzungen der intrinsischen Kameraparameter vorhergesagt wird, dass das Musterelement erscheint. Die vierte Stufe kann die simulierten Orte der entsprechenden Musterelemente mit tatsächlichen Orten, an denen die Musterelemente in den erfassten Kalibrierbildern erscheinen, vergleichen. Diese Stufe kann die Abschätzungen der intrinsischen Kameraparameter anpassen, um eine Differenz zwischen den simulierten Orten und den tatsächlichen Orten, an denen die Musterelemente erscheinen, zu reduzieren.

[0015] Bei einer Ausführungsform kann die Bestimmung von simulierten Orten als Teil einer intrinsischen Kalibrierphase der Kamerakalibrierung erfolgen. Wie nachfolgend ausführlicher beschrieben, kann die Kamerakalibrierung ferner eine Hand-Auge-Kalibrierphase umfassen. Bei einer Ausführungsform kann die Hand-Auge-Kalibrierphase auch eine Stufe umfassen, in der Abschätzungen von verschiedenen Funktionen basierend auf simulierten Orten von entsprechenden Musterelementen angepasst werden.

[0016] Ein Aspekt der Ausführungsformen hierin betrifft eine Planung verschiedener Stellungen für das Kalibriermuster, wobei das Kalibriermuster durch die Kamera in diesen Stellungen fotografiert wird. Ein Robotersteuersystem kann die Stellungen bestimmen und den Roboterarm steuern, das Kalibriermuster in diese Stellungen zu bewegen. Jede Stellung kann sich auf einen Ort und/oder eine Ausrichtung des Kalibrierusters relativ zur Kamera beziehen. Bei einer Ausführungsform kann die Stellungsplanung das Bestimmen mehrerer Orte innerhalb des Sichtfelds der Kamera einbeziehen, zu denen das Kalibriermuster durch den Roboter bewegt wird.

[0017] In einigen Fällen können die mehreren Orte auf oder in einem imaginären Würfel verteilt sein, der in das Sichtfeld der Kamera (das auch als ein Kamerasichtfeld bezeichnet wird) passt (z. B. vollständig passt). Der Gebrauch des imaginären Würfels kann der Kamera ermöglichen, das Kalibriermuster an einer Reihe von verschiedenen Orten zu erfassen, was bewirken kann, dass die Kamerakalibrierung eine größere Reihe von Situationen berücksichtigt und daher die Kamerakalibrierung robuster gemacht wird. Die verschiedenen Orte können zum Beispiel Eckorte des imaginären Würfels sowie eine Mitte des imaginären Würfels umfassen. Die Eckorte können sich näher an einer Peripherie des Sichtfelds der Kamera befinden. Die Mitte kann sich direkt vor der Kamera und insbesondere entlang einer Mittelachse des Sichtfelds der Kamera befinden. In einigen Fällen kann die Kamera einen bedeutsamen Betrag an Linsenverzerrung verursachen, wenn sie Objekte fotografiert, die sich nahe an einer Peripherie des Sichtfelds der Kamera befinden, und sie kann eine geringe oder keine Linsenverzerrung verursachen, wenn sie Objekte fotografiert, die der Mittelachse des Sichtfelds der Kamera nahe sind. Die Verwendung des imaginären Würfels zum Platzieren des Kalibrierusters kann bewirken, dass das Kalibriermuster nahe der Peripherie des Sichtfelds der Kamera und nahe an der Mittelachse des Sichtfelds der Kamera fotografiert wird. Die Kamera kann infolgedessen eine vielfältige Reihe von Kalibrierbildern erfassen, die unterschiedliche Grade an Linsenverzerrung aufweisen können. Die vielfältige Reihe von Kalibrierbildern kann daher der Kamerakalibrierung eine bessere Abschätzung einer Eigenschaft der Linsenverzerrung der Kamera ermöglichen.

[0018] Bei einer Ausführungsform kann die Ausrichtung des Kalibrierusters auch über eine Reihe von für die Kamerakalibrierung verwendeten Kalibrierbildern hinweg variiert werden. Das Robotersteuersystem kann zum Beispiel für jeden Ort der mehreren Orte einen Winkel bestimmen, in dem der Roboterarm das Kalibriermuster relativ zur Kamera neigt. Bei einer Ausführungsform können die mehreren Orte, zu denen der Roboterarm das Kalibriermuster bewegt, an oder überall in dem imaginären Würfel einheitlich verteilt sein oder sie können in dem imaginären Würfel zufällig verteilt sein. Bei einer Ausführungsform muss der imaginäre Würfel vielleicht ein Würfel sein, für den alle Eckorte durch das Kalibriermuster mittels des Roboterarms erreicht werden können. Ferner müssen die Eckorte vielleicht derart gelegen sein, dass der Roboterarm das Kalibriermuster nei-

gen kann, sodass es sich für einige oder alle Eckorte relativ zur Kamera innerhalb eines definierten Winkelbereichs befindet. Wenn ein bestimmter imaginärer Würfel die vorstehenden Bedingungen nicht erfüllt, kann das Robotersteuersystem in einigen Fällen versuchen, die vorstehenden Bedingungen mit einem kleineren imaginären Würfel zu erfüllen.

[0019] Fig. 1A veranschaulicht ein Blockdiagramm eines Roboterbetriebssystems **100** zum Ausführen einer automatischen Kamerakalibrierung. Das Roboterbetriebssystem **100** umfasst einen Roboter **150**, ein Robotersteuersystem **110** (das auch als Robotersteuerung bezeichnet wird) und eine Kamera **170**. Bei einer Ausführungsform kann sich das Roboterbetriebssystem **100** in einem Warenlager, einem Produktionsbetrieb oder in anderen Räumlichkeiten befinden. Das Robotersteuersystem **110** kann konfiguriert sein, eine Kamerakalibrierung auszuführen, die nachstehend ausführlicher erörtert wird, um Kalibrierinformationen zu bestimmen, die später verwendet werden, um den Roboter **150** zu steuern. In einigen Fällen ist das Robotersteuersystem **110** konfiguriert, sowohl die Kamerakalibrierung auszuführen als auch den Roboter **150** basierend auf den Kalibrierinformationen zu steuern. In einigen Fällen kann das Robotersteuersystem **110** zum Ausführen der Kamerakalibrierung vorgesehen sein und kann die Kalibrierinformationen an ein anderes Robotersteuersystem kommunizieren (das auch als andere Robotersteuerung bezeichnet wird), welches dann den Roboter **150** basierend auf den Kalibrierinformationen steuert. Der Roboter **150** kann basierend auf Bildern, die durch die Kamera **170** erfasst werden, und auf den Kalibrierinformationen positioniert werden.

[0020] Bei einer Ausführungsform kann das Robotersteuersystem **110** konfiguriert sein, über eine verdrahtete oder drahtlose Kommunikation mit dem Roboter **150** und der Kamera **170** zu kommunizieren. Das Robotersteuersystem **110** kann zum Beispiel konfiguriert sein, mit dem Roboter **150** und/oder der Kamera **170** über eine RS-232-Schnittstelle, eine universelle serielle Bus- (USB) -Schnittstelle, eine Ethernetschnittstelle, eine Bluetooth®-Schnittstelle, eine IEEE 802.11-Schnittstelle oder jede Kombination davon zu kommunizieren. Bei einer Ausführungsform kann das Robotersteuersystem **110** konfiguriert sein, mit dem Roboter **150** und/oder der Kamera **170** über einen lokalen Computerbus, wie beispielsweise einen Peripheral Component Interconnect- (PCI) -Bus zu kommunizieren.

[0021] Bei einer Ausführungsform kann das Robotersteuersystem **110** separat von dem Roboter **150** sein und mit dem Roboter **150** über die vorstehend beschriebene drahtlose oder verdrahtete Verbindung kommunizieren. Das Robotersteuersystem **110** kann zum Beispiel ein Einzelcomputer sein, der konfiguriert ist, mit dem Roboter **150** und der Kamera **170** über eine verdrahtete Verbindung oder eine drahtlose Verbindung zu kommunizieren. Bei einer Ausführungsform kann das Robotersteuersystem **110** ein wesentlicher Bestandteil des Roboters **150** sein und mit anderen Komponenten des Roboters **150** über den vorstehend beschriebenen lokalen Computer-Bus kommunizieren. In einigen Fällen kann das Robotersteuersystem **110** ein zugeordnetes Steuersystem sein (das auch als zugeordnete Steuerung bezeichnet wird), welches nur den Roboter **150** steuert. In anderen Fällen kann das Robotersteuersystem **110** konfiguriert sein, mehrere Roboter einschließlich des Roboters **150** zu steuern. Bei einer Ausführungsform befinden sich das Robotersteuersystem **110**, der Roboter **150** und die Kamera **170** in den gleichen Räumlichkeiten (z. B. einem Warenlager). Bei einer Ausführungsform kann sich das Robotersteuersystem **110** entfernt von dem Roboter **150** und der Kamera **170** befinden und es kann konfiguriert sein, mit dem Roboter **150** und der Kamera **170** über eine Netzwerkverbindung (z. B. eine lokale Netzwerk- (LAN) -Verbindung) zu kommunizieren.

[0022] Bei einer Ausführungsform kann das Robotersteuersystem **110** konfiguriert sein, Bilder eines an dem Roboter **150** angeordneten Kalibrierungsmusters **160** (die auch als Kalibrierbilder bezeichnet werden) abzurufen oder anderweitig zu empfangen. In einigen Fällen kann das Robotersteuersystem **110** konfiguriert sein, die Kamera **170** zu steuern, um solche Bilder zu erfassen. Das Robotersteuersystem **110** kann beispielsweise konfiguriert sein, einen Kamerabefehl zu erzeugen, der bewirkt, dass die Kamera **170** ein Bild einer Szene in einem Sichtfeld der Kamera **170** (das auch als Kamerasisichtfeld bezeichnet wird) erfasst und den Kamerabefehl über die verdrahtete oder drahtlose Verbindung an die Kamera **170** kommuniziert. Der gleiche Befehl kann bewirken, dass die Kamera **170** das Bild (als Bilddaten) auch an das Robotersteuersystem **110** zurück oder genereller an eine Speichervorrichtung kommuniziert, die durch das Robotersteuersystem **110** zugänglich ist. Das Robotersteuersystem **110** kann alternativ einen weiteren Kamerabefehl erzeugen, der bewirkt, dass die Kamera **170** nach dem Empfangen des Kamerabefehls ein Bild bzw. Bilder, die es erfasst hat, zu dem Robotersteuersystem **110** kommuniziert. Bei einer Ausführungsform kann die Kamera **170** automatisch ein Bild einer Szene in ihrem Kamerasisichtfeld entweder periodisch oder als Reaktion auf eine definierte Triggerbedingung erfassen, ohne einen Kamerabefehl von dem Robotersteuersystem **110** zu benötigen. Bei einer derartigen Ausführungsform kann die Kamera **170** auch konfiguriert sein, das Bild zu dem Robotersteuersystem **110** oder genereller zu einer Speichervorrichtung, die durch das Robotersteuersystem **110** zugänglich ist, automatisch, ohne einen Kamerabefehl von dem Robotersteuersystem **110**, zu kommunizieren.

[0023] Bei einer Ausführungsform kann das Robotersteuersystem **110** konfiguriert sein, eine Bewegung des Roboters **150** über Bewegungsbefehle zu steuern, die durch das Robotersteuersystem **110** erzeugt und über die verdrahtete oder drahtlose Verbindung zu dem Roboter **150** kommuniziert werden. Die Bewegungsbefehle können bewirken, dass der Roboter ein am Roboter angeordnetes Kalibriermuster **160** bewegt. Das Kalibriermuster **160** kann dauerhaft auf dem Roboter **150** angeordnet sein oder kann eine separate Komponente sein, die daran angebracht ist und von dem Roboter **150** entfernt werden kann.

[0024] Bei einer Ausführungsform sind die einzigen Bilder, die dazu verwendet werden, den Roboter **150** zu steuern, diejenigen, die durch die Kamera **170** erfasst werden. Bei einer weiteren Ausführungsform kann der Roboter **150** durch Bilder der mehreren Kameras gesteuert werden. **Fig. 1B** veranschaulicht ein Roboterbetriebssystem **100A**, das eine Ausführungsform des Roboterbetriebssystems **100** ist. Das System **100A** umfasst mehrere Kameras, wie beispielsweise die Kamera **170** und die Kamera **180**. Das Robotersteuersystem **110** kann konfiguriert sein, Bilder sowohl von der Kamera **170** als auch von der Kamera **180** zu empfangen und eine Bewegung des Roboters **150** basierend auf den Bildern der zwei Kameras **170**, **180** zu steuern. In einigen Fällen kann das Vorhandensein der zwei Kameras **170**, **180** räumliches Sehen an das Robotersteuersystem **110** bereitstellen. Das Robotersteuersystem **110** kann konfiguriert sein, eine Kamerakalibrierung sowohl für die Kamera **170** als auch für die Kamera **180** auszuführen, wie es nachfolgend ausführlicher erörtert wird. Bei einer Ausführungsform kann das Robotersteuersystem **110** beide Kameras **170**, **180** steuern, um entsprechende Bilder des Kalibrierusters **160** zu erfassen und eine Kamerakalibrierung auszuführen. Bei einer Ausführungsform kann das Roboterbetriebssystem **100A** genau zwei Kameras oder mehr als zwei Kameras aufweisen.

[0025] **Fig. 1C** stellt ein Blockdiagramm des Robotersteuersystems **110** dar. Wie in dem Blockdiagramm veranschaulicht, kann das Robotersteuersystem **110** eine Steuerschaltung **111**, eine Kommunikationsschnittstelle **113** und ein nicht flüchtiges computerlesbares Medium **115** (z. B. Speicher) umfassen. Bei einer Ausführungsform kann die Steuerschaltung **111** einen oder mehrere Prozessoren, eine programmierbare Logikschaltung (PLC) oder eine programmierbare logische Anordnung (PLA), ein feldprogrammierbares Gate-Array (FPGA), eine anwendungsspezifische integrierte Schaltung (ASIC) oder irgendeine andere Steuerschaltung umfassen.

[0026] Bei einer Ausführungsform kann die Kommunikationsschnittstelle **113** eine oder mehrere Komponenten umfassen, die konfiguriert sind, mit der Kamera **170** und dem Roboter **150** zu kommunizieren. Die Kommunikationsschnittstelle **113** kann zum Beispiel eine Kommunikationsschaltung umfassen, die konfiguriert ist, Kommunikation über ein verdrahtetes oder drahtloses Protokoll auszuführen. Die Kommunikationsschaltung kann als Beispiel einen RS-232-Port-Controller, einen USB-Controller, einen Ethernet-Controller, einen Bluetooth®-Controller, einen PCI-Bus-Controller, jede andere Kommunikationsschaltung oder eine Kombination davon umfassen.

[0027] Bei einer Ausführungsform kann das nicht flüchtige computerlesbare Medium **115** einen Computerspeicher umfassen. Der Computerspeicher kann z. B. dynamischen Random Access Memory (DRAM), integrierten Festkörperspeicher und/oder ein Festplattenlaufwerk (HDD) umfassen. In einigen Fällen kann die Kamerakalibrierung durch computerausführbare Befehle (z. B. Computercode), die auf dem nicht flüchtigen computerlesbaren Medium **115** gespeichert sind, implementiert sein. In solchen Fällen kann die Steuerschaltung **111** einen oder mehrere Prozessoren umfassen, die zum Ausführen der computerausführbaren Befehle konfiguriert sind, um die Kamerakalibrierung auszuführen (z. B. die in den **Fig. 4** und **Fig. 9A** und **Fig. 9B** veranschaulichten Schritte).

[0028] Die Kamerakalibrierung kann wie vorstehend angegeben ausgeführt werden, um die Steuerung eines Roboters basierend auf durch eine Kamera erfasste Bilder zu erleichtern. **Fig. 2A** stellt zum Beispiel ein Roboterbetriebssystem **200** dar, in dem die Bilder verwendet werden, um einen Roboter **250** so zu steuern, dass er einen Gegenstand **292** in einem Warenlager aufzunehmen. Das Roboterbetriebssystem **200** kann insbesondere eine Ausführungsform des Systems **100** von **Fig. 1A** sein und umfasst eine Kamera **270**, den Roboter **250** und das Robotersteuersystem **110** von **Fig. 1A**. Die Kamera **270** kann eine Ausführungsform der Kamera **170** von **Fig. 1A** sein, und der Roboter **250** kann eine Ausführungsform des Roboters **150** von **Fig. 1A** sein. Die Kamera **270** kann konfiguriert sein, ein Bild des Objekts **292** (z. B. ein Paket zum Versand), das auf einem Förderband **293** in dem Warenlager angeordnet ist, zu erfassen, und das Robotersteuersystem **110** kann konfiguriert sein, den Roboter **250** zu steuern, um das Objekt **292** aufzunehmen.

[0029] Bei der Ausführungsform von **Fig. 2A** kann der Roboter **250** eine Basis **252** und einen Roboterarm aufweisen, der relativ zur Basis **252** beweglich ist. Der Roboterarm kann insbesondere mehrere der Verbindungen **254A** bis **254C** umfassen, die relativ zueinander drehbar sind, und einen Greifer **255**, der an der Verbindung **254C** angebracht ist, wobei der Greifer verwendet werden kann, Objekte aufzunehmen. Bei einer

Ausführungsform kann das Robotersteuersystem **110** konfiguriert sein, einen Bewegungsbefehl zu kommunizieren, um eine oder mehrere der Verbindungen **254A** bis **254C** zu drehen. Der Bewegungsbefehl kann ein Low-Level-Befehl, wie Motorbewegungsbefehle, oder ein High-Level-Befehl sein. Wenn der Bewegungsbefehl von dem Robotersteuersystem **110** ein High-Level-Befehl ist, kann der Roboter **150** konfiguriert sein, den High-Level-Befehl in einen Low-Level-Befehl umzuwandeln.

[0030] Bei einer Ausführungsform ist es eine der Aufgaben der Kamerakalibrierung eine Beziehung zwischen der Kamera **270** und dem Roboter **250** oder insbesondere eine Beziehung zwischen der Kamera **270** und einem Referenzpunkt **294**, der relativ zur Basis **252** des Roboters **250** stationär ist, zu bestimmen. Die Kalibrierinformationen können mit anderen Worten Informationen umfassen, die eine Beziehung zwischen der Kamera **270** und dem Referenzpunkt **294** beschreiben. Bei einer Ausführungsform kann diese Beziehung einen Ort der Kamera **270** relativ zum Referenzpunkt **294** sowie eine Ausrichtung der Kamera **270** relativ zu einer Referenzausrichtung für den Roboter **250** bezeichnen. Bei einer Ausführungsform kann die Referenzausrichtung verwendet werden, um ein Weltkoordinatensystem zu definieren, wie es nachfolgend ausführlicher beschrieben wird, und die vorstehende Beziehung kann als eine Kamera-zu-Welt-Beziehung bezeichnet werden. In einigen Fällen kann die Kamera-zu-Welt-Beziehung verwendet werden, eine Beziehung zwischen der Kamera **270** und dem Objekt **292** (auch als Kamera-zu-Objekt-Beziehung bezeichnet) und eine Beziehung zwischen dem Objekt **292** und dem Referenzpunkt **294** (auch als Objekt-zu-Welt-Beziehung bezeichnet) zu bestimmen. Die Kamera-zu-Objekt-Beziehung und die Objekt-zu-Welt-Beziehung können verwendet werden, um den Roboter **250** so zu steuern, dass er das Objekt **292** aufnimmt. Das Robotersteuersystem **110** kann zum Beispiel konfiguriert sein, einen Ort und eine Ausrichtung des Greifers **255** oder des Gelenks **254C** (z. B. eine Beziehung des Gelenks zu dem Objekt) relativ zu dem Objekt **292** basierend auf der Kamera-zu-Objekt-Beziehung, der Objekt-zu-Welt-Beziehung, der Kamera-zu-Welt-Beziehung oder einer Kombination davon zu bestimmen.

[0031] Bei einer Ausführungsform umfasst die Kamerakalibrierung eine intrinsische Kalibrierphase und eine Hand-Auge-Kalibrierphase. **Fig. 2B** stellt ein Beispiel von Informationen dar, die von der intrinsischen Kalibrierphase und der Hand-Auge-Kalibrierphase bestimmt werden, und veranschaulicht ferner ein Kalibriermuster **260**, das verwendet wird, um die Kamerakalibrierung auszuführen. Bei einer Ausführungsform kann das Kalibriermuster **260** direkt und feststehend an dem Gelenk **254C** angebracht sein, sodass das Kalibriermuster **260** relativ zu dem Gelenk **254C** stationär verbleibt. Die intrinsische Kalibrierphase kann das automatische Bestimmen entsprechender Abschätzungen für intrinsische Kameraparameter der Kamera **270** einbeziehen. Bei einer Ausführungsform kann ein intrinsischer Kameraparameter der Kamera **270** jeder Parameter sein, dessen Wert von einem Ort und einer Ausrichtung der Kamera **270** unabhängig ist. Wie nachfolgend ausführlicher erörtert, können die intrinsischen Kameraparameter eine Eigenschaft der Kamera **270**, wie beispielsweise ihre Brennweite, eine Größe ihres Bildsensors oder einen durch die Kamera **270** eingeführten Linsenverzerungseffekt kennzeichnen. Bei einer Ausführungsform kann die Hand-Auge-Kalibrierphase das automatische Bestimmen der Kamera-zu-Welt-Beziehung und einer Beziehung zwischen dem Kalibriermuster **260** und dem Gelenk **254C** (die auch als Muster-zu-Gelenk-Beziehung bezeichnet wird) oder insbesondere eine Beziehung zwischen dem Kalibriermuster **260** und einem Referenzpunkt **296** an dem Gelenk **254C** einbeziehen. Bei einer Ausführungsform können die Kamera-zu-Welt-Beziehung und die Muster-zu-Gelenk-Beziehung basierend auf einer Beziehung zwischen der Kamera **270** und dem Muster **260** (die auch als Kamera-zu-Muster-Beziehung bezeichnet wird) und auf einer Beziehung zwischen dem Gelenk **254C** und dem Referenzpunkt **294** (die auch als Gelenk-zu-Welt-Beziehung bezeichnet wird) bestimmt werden. In einigen Fällen kann die Kamera-zu-Muster-Beziehung basierend auf Resultaten der intrinsischen Kalibrierung bestimmt werden, während die Gelenk-zu-Welt-Beziehung basierend auf Bewegungsbefehlen bestimmt werden kann, die das Robotersteuersystem **110** zum Roboter **250** kommuniziert hat. Bei einer Ausführungsform kann die Kamerakalibrierung eine Stereokalibrierungsphase für Systeme umfassen, die mehrere Kameras umfassen. Die Stereokalibrierungsphase kann das Bestimmen einer Beziehung zwischen den mehreren Kameras einbeziehen, wie beispielsweise einen Ort und eine Ausrichtung einer Kamera relativ zu einem Ort und einer Ausrichtung einer anderen Kamera.

[0032] Bei einer Ausführungsform können die intrinsischen Kameraparameter einer Kamera beschreiben, wie ein zur Kamera externes Objekt als ein Bild auf ihren Bildsensor projiziert wird und wie eine Linse ein Erscheinungsbild des Objekts in dem Bild verzerrt. **Fig. 3A** stellt zum Beispiel ein Blockdiagramm einer Kamera **370** dar, die eine Ausführungsform der Kamera **170** der **Fig. 1A** und der Kamera **270** von **Fig. 2A** ist, die eine oder mehrere Linsen **371**, einen Bildsensor **373** und eine Kommunikationsschnittstelle **375** umfasst. Die Kommunikationsschnittstelle **375** kann konfiguriert sein, mit dem Robotersteuersystem **110** von **Fig. 1A** zu kommunizieren, und sie kann der Kommunikationsschnittstelle **113** von **Fig. 1A** des Robotersteuersystems **110** ähnlich sein. Bei einer Ausführungsform können die eine oder die mehreren Linsen **371** Licht fokussieren, das von der Außenseite der Kamera **370** auf den Bildsensor **373** fällt. Bei einer Ausführungsform kann der Bildsensor **373** ein Pixelarray umfassen, das konfiguriert ist, ein Bild über entsprechende Pixelintensitätswerte darzustellen.

Der Bildsensor **373** kann einen ladungsträgergekoppelten Vorrichtungss- (CCD) -Sensor, einen komplementären Metalloxidhalbleiter- (CMOS) -Sensor, einen Quantenbildsensor (QIS) oder irgendeinen anderen Bildsensor umfassen.

[0033] Wie vorstehend angegeben, können die intrinsischen Kameraparameter beschreiben, wie ein Objekt in einem Sichtfeld der Kamera **370** (auch als deren Kamerasishtfeld bezeichnet) als ein Bild auf einen Bildsensor projiziert wird, oder insbesondere wie verschiedene Orte, an denen das Objekt angeordnet ist, auf ein Pixelar-

ray des Bildsensors projiziert werden. **Fig. 3B** veranschaulicht zum Beispiel einen Ort $[XYZ]_{Camera}^T$ außerhalb einer Kamera **370A**, wobei das hochgestellte Zeichen von T ein Transponieren bezeichnet und das tiefgestellte Zeichen von Camera (Kamera) die X-, Y- und Z-Koordinaten bezeichnet, wie sie in einem Kamerakoordinatensystem ausgedrückt werden. Die Kamera **370A** kann insbesondere eine Ausführungsform der Kamera **370** sein und eine oder mehrere Linsen **371A** und einen Bildsensor **373A** umfassen. Ein Ort und eine Ausrichtung der Kamera **370A** können verwendet werden, um ein Kamerakoordinatensystem zu definieren. **Fig. 3B** stellt das

Kamerakoordinatensystem dar, das durch die orthogonalen Koordinatenachsen $\vec{X}_{camera}$, $\vec{Y}_{camera}$, $\vec{Z}_{camera}$ zu definieren ist. Die Koordinatenachsen können mit einer Ausrichtung von verschiedenen Komponenten der Kamera **370A** ausgerichtet sein. Die Koordinatenachse $\vec{Z}_{camera}$ kann zum Beispiel gleich einer Mittelachse eines Kamerasishtfelds der Kamera **370A** sein, die gleich einer optischen Achse der einen oder mehreren Linsen

371A sein kann. In einigen Fällen können die Koordinatenachsen $\vec{X}_{camera}$ and $\vec{Y}_{camera}$ zu den Kanten des Bildsensors **373A** parallel sein. Ferner kann ein Ursprung des Kamerakoordinatensystems gleich einem Ort einer Linse der einen oder mehreren Linsen **371A**, einem Ort einer Öffnung der Kamera **370A** oder einem anderen Ort (z. B. einem Ort an, vor oder hinter dem Bildsensor **373A**) sein.

[0034] Bei einer Ausführungsform kann das Licht von dem Ort $[XYZ]_{Camera}^T$ auf eine Koordinate

$\left[-\frac{X}{f} - \frac{Y}{f} - f \right]_{Camera}^T$ in der Kamera projiziert werden, wobei f eine Brennweite der einen oder mehreren Lin-

sen **371A** ist. Diese Koordinate im Kamerakoordinatensystem kann auch einer Pixelkoordinate $[uv]_{Sensor}^T$ auf einem Bildsensorkoordinatensystem entsprechen. **Fig. 3B** stellt das Bildsensorkoordinatensystem dar, das

durch die Koordinatenachsen $\vec{U}_{sensor}$, $\vec{V}_{sensor}$ zu definieren ist, die mit entsprechenden Kanten des Bildsensors **373A** ausgerichtet sein können. Das Bildsensorkoordinatensystem kann einen Ursprung aufweisen, der sich an einer Ecke des Bildsensors **373A** befindet.

[0035] Bei einer Ausführungsform kann ein intrinsischer Kameraparameter einen Wert aufweisen, der ein Skalarwert, ein Vektor oder eine Matrix ist. Bei einer Ausführungsform ist einer der intrinsischen Kamerapara-

meter eine Projektionsmatrix K, die eine geometrische Beziehung zwischen dem Ort $[XYZ]_{Camera}^T$ und dem Ort

$[uv]_{Sensor}^T$ modelliert. Die Abschätzung dieses intrinsischen Kameraparameters kann eine abgeschätzte Matrix sein, die entsprechende Schätzwerte von Komponenten der Matrix umfassen kann. In einigen Fällen kann

die Projektionsmatrix K eine verzerrungsfreie Beziehung zwischen $[XYZ]_{Camera}^T$ und $[uv]_{Sensor}^T$ modellieren, während ein anderer intrinsischer Kameraparameter oder Satz von intrinsischen Kameraparametern für einen Linsenverzerrungseffekt verantwortlich sein kann, wie es nachfolgend ausführlicher beschrieben wird. Bei ei-

ner Ausführungsform ist $K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & C_x \\ 0 & f_y & C_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ und $[uv]_{Sensor}^T = K[X/Y/Z]_{Camera}^T$. Bei diesem Beispiel kann

f_x ein erster Skalenfaktor basierend auf der Brennweite f und einer Pixelgröße des Bildsensors **373A** entlang der Achse $\vec{U}_{sensor}$ sein. Ähnlich kann f_y ein zweiter Skalenfaktor basierend auf einer Brennweite f der Kamera

370A und einer Pixelgröße des Bildsensors **373A** entlang der Achse $\vec{V}_{sensor}$ sein. Sowohl f_x als auch f_y können eine Einheit von Pixeln pro Millimeter aufweisen. Der Wert C_x kann ein erster Teil eines Hauptpunktversatzes sein und kann auf einem Abstand entlang der Achse $\vec{U}_{sensor}$ zwischen einem Ursprung des Bildsensorkoordi-

natensystems und einem Ursprung des Kamerakoordinatensystems basieren. Der Wert C_y kann ein zweiter Teil eines Hauptpunktversatzes sein und kann auf einem Abstand entlang der Achse $\vec{V}_{sensor}$ zwischen dem Ursprung des Bildsensorkoordinatensystems und dem Ursprung des Kamerakoordinatensystems basieren. Wie vorstehend angegeben ist die Projektionsmatrix K ein intrinsischer Kameraparameter und jedes von f_x , f_y , C_x und C_y ist eine Komponente der Matrix, wobei jede der Komponenten einen Skalarwert aufweist. Bei einer Ausführungsform kann jedes von f_x , f_y , C_x , C_y und die Brennweite f auch als ein intrinsischer Kameraparameter betrachtet werden, wobei ein Wert von jedem dieser intrinsischen Kameraparameter ein Skalarwert ist.

[0036] Bei einer Ausführungsform umfassen die intrinsischen Kameraparameter einen oder mehrere Verzerrungsparameter, die einen Linsenverzerrungseffekt kennzeichnen können, der durch die eine oder die mehreren Linsen **371A** verursacht ist. Bei einer Ausführungsform kann der intrinsische Kameraparameter ein Parameter in einer Verzerrungsfunktion sein. Die Linsenverzerrung der einen oder der mehreren Lin-

sen **371A** kann zum Beispiel als ein Effekt modelliert werden, der einen Ort $[XYZ]_{Camera}^T$ so erscheinen

lässt, wie wenn er sich bei $[\hat{X}\hat{Y}\hat{Z}]_{Camera}^T$ befände, wobei eine erste Funktion d_x (die als eine erste Verzerrungsfunktion bezeichnet werden kann) $\hat{X}$ auf die Werte von X , Y , and Z beziehen kann und eine zweite Funktion d_y (die auch als eine zweite Funktion bezeichnet wird) $\hat{Y}$ auf die Werte von X , Y , and Z bezie-

hen kann. In einem Modell
$$d_x = \hat{X} = \frac{X}{Z} \left(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 \right) + 2p_1 \frac{X}{Z} \frac{X}{Z} + p_2 \left(r^2 \left(\frac{X}{Z} \right)^2 \right)$$
 zum Beispiel, wobei

$r^2 = \left(\frac{X}{Z} \right)^2 + \left(\frac{Y}{Z} \right)^2$. Bei diesem Beispiel kann jedes k_1 , k_2 , k_3 , p_1 , p_2 ein Verzerrungsparameter sein, der einen Skalarwert aufweist, und eine Abschätzung eines bestimmten Verzerrungsparameters kann ein abgeschätzter Skalarwert sein.

[0037] Ferner kann eine Abschätzung für einen Satz von Verzerrungsparametern (z. B. k_1 , k_2 , k_3 , p_1 , p_2) bestimmt werden, wobei die Abschätzung des Satzes von Verzerrungsparametern sich auf einen Satz von entsprechenden abgeschätzten Skalarwerten für den Satz von Verzerrungsparametern bezieht.

[0038] Die Kamerakalibrierung kann, wie vorstehend angegeben, eine Hand-Auge-Kalibrierphase einbeziehen, die eine Beziehung zwischen der Kamera und der Umgebung der Kamera oder eine Beziehung zwischen einem Kalibriermuster und der Umgebung des Musters bestimmt. Die Hand-Auge-Kalibrierung wird nachfolgend ausführlicher beschrieben. Bei einer Ausführungsform können die externen Parameter die Kamera-zu-Welt-Beziehung und die Muster-zu-Gelenk-Beziehung beschreiben, wie es in **Fig. 2B** veranschaulicht ist. Bei einer Ausführungsform kann die Kamera-zu-Welt-Beziehung mittels einer Transformationsfunktion beschrieben werden, die eine Beziehung zwischen dem Kamerakoordinatensystem und einem Weltkoordinatensystem beschreibt. Das Weltkoordinatensystem ist in **Fig. 3C** veranschaulicht und ist durch die Koordinatenachsen

$\vec{X}_{World}$, $\vec{Y}_{World}$, $\vec{Z}_{World}$ definiert. Ein Ursprung des Weltkoordinatensystems ist ein Referenzpunkt **394**, der jeder Punkt sein kann, der relativ zu einer Basis **352** eines Roboters **350** stationär ist. Bei einer Ausführungsform

können die Achsen $\vec{X}_{World}$, $\vec{Y}_{World}$, $\vec{Z}_{World}$ eine willkürliche Ausrichtung aufweisen. Bei einer Ausführungsform können die Achsen $\vec{X}_{World}$, $\vec{Y}_{World}$, $\vec{Z}_{World}$ relativ zu einer Struktur des Roboters **350** oder zu einer Umgebung

(z. B. einem Warenlager) definiert sein, in der sich der Roboter **350** befindet. Die Achse $\vec{Z}_{World}$ muss beispielsweise vielleicht orthogonal zu einem Boden des Warenlagers sein. Bei einer Ausführungsform kann die vorste-

hende Transformationsfunktion eine Matrix T_{World}^{Camera} sein, die eine lineare Transformation von dem Kamerako-

ordinatensystem zu dem Weltkoordinatensystem definiert. Die vorstehende Nomenklatur von T_a^b bezeichnet eine Transformationsmatrix für eine b-zu-a-Transformation, die eine Zuordnung von einer Koordinate in einem Koordinatensystem „b“ zu einer Koordinate in einem Koordinatensystem „a“ definiert. Bei einem Beispiel hat

T_a^b die Form

$$T_a^b = \begin{bmatrix} R_{ba} & t_{ba} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

In dem vorstehenden Beispiel ist R_{ba} eine relative Rotationsmatrix zwischen den Koordinatensystemen b und dem Koordinatensystem a und t_{ba} ist ein relativer Translationsvektor zwischen dem Koordinatensystem b zu dem Koordinatensystem a.

[0039] Bei einer Ausführungsform kann die Muster-zu-Gelenk-Beziehung über eine Transformationsfunktion beschrieben werden, die eine Beziehung zwischen einem Musterkoordinatensystem und einem Gelenkkoordinatensystem beschreibt, wovon ein Beispiel in **Fig. 3C** dargestellt ist. Bei einer Ausführungsform kann ein Kalibriermuster **360** verwendet sein, um die Kamerakalibrierung auszuführen, und es kann an einem Gelenk **354** des Roboters **350** angebracht sein, wobei das Gelenk **354** mindestens einen Teil eines Roboterarms des Roboters **350** bilden kann. Das Musterkoordinatensystem kann ein Koordinatensystem sein, das in Bezug auf das Kalibriermuster **360** definiert ist. Das Musterkoordinatensystem kann zum Beispiel durch die Koordinatenachse

$\vec{X}_{Pattern}, \vec{Y}_{Pattern}, \vec{Z}_{Pattern}$ definiert sein und kann einen Ursprung aufweisen, der sich an einer Mitte des Kalibriermusters **360** befindet. Bei einer Ausführungsform kann das Kalibriermuster **360** aus einer flachen rechteckigen Tafel oder einem flachen rechteckigen Blatt (z. B. Aufkleber) gebildet sein und $\vec{X}_{Pattern}, \vec{Y}_{Pattern}$ kann parallel zu entsprechenden Kanten der flachen Tafel oder des flachen Blatts sein, während $\vec{Z}_{Pattern}$ orthogonal zu der flachen Tafel oder dem flachen Blatt ist. **Fig. 3C** veranschaulicht auch das Gelenkkoordinatensystem, das durch die Koordinatenachsen $\vec{X}_{link}, \vec{Y}_{link}, \vec{Z}_{link}$ definiert sein kann. Bei einer Ausführungsform ist ein Ursprung des Gelenkkoordinatensystems ein Punkt **396** auf dem Gelenk **354**. Das Gelenk **354** kann an dem Kalibriermuster **360** feststehend angebracht sein, sodass das Kalibriermuster **360** relativ zu dem Gelenk **354**

stationär ist. Bei einer Ausführungsform kann eine Ausrichtung der Koordinatenachse $\vec{X}_{link}, \vec{Y}_{link}, \vec{Z}_{link}$ die gleiche sein wie eine Ausrichtung des Gelenks **354**. Bei einer Ausführungsform kann die Transformationsfunktion für die Muster-zu-Gelenk-Beziehung eine Matrix $T_{Link}^{Pattern}$ sein, die eine lineare Transformation zwischen dem Musterkoordinatensystem und dem Gelenkkoordinatensystem definiert. Bei einer Ausführungsform kann $T_{Link}^{Pattern}$ vor dem Ausführen der Hand-Auge-Kalibrierphase unbekannt sein und die Hand-Auge-Kalibrierphase kann das Bestimmen einer Abschätzung von $T_{Link}^{Pattern}$ zusammen mit einer Abschätzung einer Kamera-zu-Welt-Beziehung (z. B. T_{World}^{Camera}) einbeziehen.

[0040] Wie nachfolgend ausführlicher beschrieben, können einige Ausführungsformen der Hand-Auge-Kalibrierphase die Kamera-zu-Welt-Beziehung und die Muster-zu-Gelenk-Beziehung basierend auf einer Kamera-zu-Muster-Beziehung und einer Gelenk-zu-Welt-Beziehung bestimmen. Bei einer Ausführungsform kann die

Kamera-zu-Muster-Beziehung durch eine Matrix $T_{Pattern}^{Camera}$ definiert sein, die eine lineare Transformation zwischen dem Kamerakoordinatensystem und dem Musterkoordinatensystem definiert. Bei einer Ausführungsform kann die Gelenk-zu-Welt-Beziehung durch eine Matrix T_{World}^{Link} definiert sein, die eine lineare Transformation zwischen dem Gelenkkoordinatensystem und dem Weltkoordinatensystem definiert.

[0041] Bei einer Ausführungsform, bei der ein Roboter basierend auf Bildern von zwei oder mehr Kameras gesteuert wird, kann die Kamerakalibrierung eine Stereokalibrierungsphase einbeziehen, die eine Transformationsfunktion abschätzt oder anderweitig bestimmt, welche eine Beziehung zwischen einem Kamerakoordinatensystem einer ersten Kamera (z. B. Kamera 1 in **Fig. 1B**) und einem Kamerakoordinatensystem einer zweiten Kamera (z. B. Kamera 2 in **Fig. 1B**) beschreibt. Bei einer Ausführungsform kann solch eine Transformationsfunktion eine Matrix $T_{Camera2}^{Camera1}$ sein, die eine lineare Transformation zwischen den zwei Kamerakoordinatensystemen definiert.

[0042] Die Kamerakalibrierung kann wie vorstehend angegeben, das Bestimmen von Orten und/oder Ausrichtungen einbeziehen, an denen ein Kalibriermuster durch eine Kamera fotografiert wird, wobei die resultierenden Bilder verwendet werden, die intrinsische Kalibrierung, Hand-Auge-Kalibrierung und/oder Stereokalibrierung auszuführen. Das Kalibriermuster kann zum Beispiel zu mehreren Orten bewegt werden, die an oder überall in einem imaginären Würfel verteilt sind, der in ein Kamerasichtfeld der Kamera passt. **Fig. 4** stellt ein Ablaufdiagramm

gramm dar, das ein Verfahren **400** zum Erlangen von Bildern eines Kalibrieramusters (die auch als Kalibrierbilder bezeichnet werden) zum Ausführen einer Kamerakalibrierung veranschaulicht. Bei einer Ausführungsform wird das Verfahren **400** durch die Steuerschaltung **111** von **Fig. 1A** des Robotersteuersystems **110** von **Fig. 1A** ausgeführt. Das Robotersteuersystem **110** kann wie vorstehend angegeben eine Kommunikationsschnittstelle umfassen, die konfiguriert ist, mit einem Roboterarm und mit einer Kamera zu kommunizieren.

[0043] Eine beispielhafte Umgebung, in der das Verfahren **400** ausgeführt wird, ist in **Fig. 5A** dargestellt, die ein Roboterbetriebssystem **500** darstellt, welches das Robotersteuersystem **110** von **Fig. 1A** in Kommunikation mit der Kamera **470** und einen Roboter **450** umfasst. Die Kamera **470** kann eine Ausführungsform der Kamera **170/270/370** von **Fig. 1A/ Fig. 2A/ Fig. 3A** sein und der Roboter kann eine Ausführungsform des Roboters **150/250/350** von **Fig. 1A/ Fig. 2A/ Fig. 3A** sein. Der Roboter **450** kann eine Basis **452** und einen relativ zur Basis **452** beweglichen Roboterarm umfassen. Der Roboterarm umfasst ein oder mehrere Gelenke, wie beispielsweise die Gelenke **454A** bis Gelenk **454E**. Bei einer Ausführungsform können die Gelenke **454A-454E** drehbar aneinander angebracht sein. Das Gelenk **454A** kann zum Beispiel an der Roboterbasis **452** mittels einer Verbindung **456A** drehbar angebracht sein. Die verbleibenden Gelenke **454B** bis **454E** können mittels der Verbindungen **456B** bis **456E** drehbar aneinander angebracht sein. Bei einer Ausführungsform können die Gelenke (z. B. **454B** bis **454E**) über eine oder mehrere prismatische Verbindungen ausschließlich oder in Kombination mit anderen Arten von Verbindungen (z. B. einer oder mehreren zylindrischen Verbindungen) verbunden sein. Bei einer derartigen Ausführungsform, welche die eine oder die mehreren prismatischen Verbindungen einbezieht, können die Gelenke als linear aneinander angebracht bezeichnet werden. Bei einer Ausführungsform kann die Basis **452** verwendet werden, um den Roboter **452** an z. B. einem Einbaurahmen oder einer Einbaufläche (z. B. dem Boden eines Warenlagers) anzubringen. Bei einer Ausführungsform kann der Roboter **450** mehrere Motoren umfassen, die konfiguriert sind, den Roboterarm durch Drehen der Gelenke **454A** bis **454E** zu bewegen. Einer der Motoren kann zum Beispiel konfiguriert sein, das erste Gelenk **454A** in Bezug zu der Verbindung **456A** und der Basis **402** zu drehen, wie es mit dem punktierten Pfeil in **Fig. 5A** gezeigt ist. Ähnlich können andere Motoren der mehreren Motoren konfiguriert sein, die Gelenke **454B** bis **454E** zu drehen. Die mehreren Motoren können durch das Robotersteuersystem **110** gesteuert werden. **Fig. 5A** stellt ferner ein Kalibrieramuster **460** dar, das in einer fixierten Weise an dem fünften Gelenk **454E** angeordnet ist, sodass Drehbewegungen der Gelenke **454A** bis **454E** oder eine andere Bewegung des Roboters **450** weder einen Ort noch eine Ausrichtung des Kalibrieramusters **460** relativ zu dem Gelenk **454E** ändert. Bei einer Ausführungsform kann das Kalibrieramuster **460** auf das Gelenk **454E** lackiert sein. Bei einer Ausführungsform kann das Kalibrieramuster **460** Teil einer Kalibriertafel sein, die an dem Gelenk **454E** angebracht ist.

[0044] Unter erneuter Bezugnahme auf **Fig. 4** kann das Verfahren **400** bei einer Ausführungsform mit Schritt **401** beginnen, bei dem die Steuerschaltung **111** alle Eckorte eines imaginären Würfels bestimmen kann, der in ein Kamerasichtfeld passt (z. B. vollständig passt), wobei das Kamerasichtfeld sich auf ein Sichtfeld einer Kamera beziehen kann. **Fig. 5B** stellt ein beispielhaftes Kamerasichtfeld **510** dar, das ein Sichtfeld der Kamera **470** sein kann, und ferner einen imaginären Würfel **550**, der in das Kamerasichtfeld **510** passt. Bei einer Ausführungsform kann das Kamerasichtfeld **510** eine imaginäre Pyramide bilden, die sich nach außen von der Kamera **470** ausbreitet. In einigen Fällen kann eine Breite des Kamerasichtfelds **510** von einer Brennweite von einer oder mehreren Linsen der Kamera **470** abhängen. **Fig. 5C** stellt ein Beispiel der Eckorte des imaginären Würfels **550** dar. Der imaginäre Würfel **550** weist insbesondere acht Eckorte **551A** bis **551H** auf, die den acht Ecken des imaginären Würfels **550** entsprechen. Bei einer Ausführungsform kann das Bestimmen eines Eckorts des imaginären Würfels das Bestimmen einer Koordinate (z. B. $[XYZ]_{World}^T$) des Eckorts einbeziehen.

[0045] Bei einer Ausführungsform kann der imaginäre Würfel **550** einen Raum definieren, an oder in dem das Kalibrieramuster **460** durch einen Roboterarm des Roboters **450** bewegt wird. Die Kamera **470** kann mehrere Bilder des Kalibrieramusters **460** erfassen (die auch als Kalibrierbilder bezeichnet werden), die unterschiedlichen Orten an oder in dem imaginären Würfel **550** entsprechen. Obwohl das Kalibrieramuster **460** in dem Raum bewegt werden kann, der durch eine unterschiedliche Form, wie beispielsweise eine Sphäre, definiert ist, kann der Raum, der durch den imaginären Würfel **550** definiert wird, Orte umfassen, die sich näher an einer Peripherie des Kamerasichtfelds **510** der Kamera **470** befinden. Die acht Eckorte des imaginären Würfels **550** können sich beispielsweise nahe einer Peripherie des Kamerasichtfelds **510** befinden. Wenn die Kamera **470** eine Linsenverzerrung oder andere Formen der Kameraverzerrung aufweist, kann eine Auswirkung der Linsenverzerrung auf ein Kalibrierbild ausgeprägter sein, wenn das Kalibrieramuster **460** sich nahe der Peripherie des Kamerasichtfelds **510** befindet, relativ dazu, wenn sich das Kalibrieramuster **460** z. B. um eine Mitte des Kamerasichtfelds **510** herum befindet. Der imaginäre Würfel **550** kann daher die Erfassung von Kalibrierbildern erleichtern, in denen ein Effekt der Verzerrung ausgeprägter ist, was ermöglichen kann, dass die Kamerakalibrierung eine korrektere Abschätzung für einen Verzerrungsparameter der Kamera **470** erzeugt.

[0046] Unter erneuter Bezugnahme auf **Fig. 4** kann das Verfahren **400** ferner einen Schritt **403** umfassen, bei dem die Steuerschaltung **111** mehrere Orte bestimmen kann, die an oder überall in dem imaginären Würfel verteilt sind, wobei das Kalibrieremuster mindestens teilweise an jedem Ort der mehreren Orte für die Kamera sichtbar ist.

[0047] Bei einer Ausführungsform sind die mehreren Orte an oder überall in dem imaginären Würfel einheitlich verteilt (was auch als gleichmäßig verteilt bezeichnet wird). Bei einer Ausführungsform können die mehreren Orte genau n^3 Orte sein, die einheitlich an oder in dem imaginären Würfel verteilt sind, wobei n eine positive ganze Zahl ist, die gleich oder größer als 2 oder gleich oder größer als 3 ist. **Fig. 5C** veranschaulicht zum Beispiel eine Ausführungsform von genau 27 Orten, die einheitlich an oder überall in dem imaginären Würfel **550** verteilt sind. Bei einer Ausführungsform weisen die mehreren einheitlich verteilten Orte wie entlang einer Kante des imaginären Würfels gemessen zwischen unmittelbar angrenzenden Orten der mehreren Orte einen einheitlichen Abstand auf. Der Eckort **551A** kann zum Beispiel ein zu den Orten **5511** bis **551N** unmittelbar angrenzender Ort sein. Der Eckort **551A** und die unmittelbar angrenzenden Orte **5511** bis **551N** können wie entlang einer Kante des imaginären Würfels **550** gemessen einen einheitlichen Abstand aufweisen. Der Eckort **551A** kann insbesondere entlang einer Kante **553A**, **553B** oder **553C** gemessen den gleichen Abstand zu jedem von den unmittelbar angrenzenden Orten **551** bis **551N** aufweisen. Dieser Abstand kann z. B. die Hälfte einer Länge jeder Seite des imaginären Würfels **550** sein. Bei einer weiteren Ausführungsform kann der imaginäre Würfel **550** in n^3 kleinere, nicht überlappende Würfel (z. B. 27 kleinere Würfel) aufgeteilt sein, sodass die kleineren Würfel den imaginären Würfel **550** einheitlich aufteilen. Bei einer derartigen Implementierung kann jeder Ort der mehreren einheitlich verteilten Orte einer Mitte eines entsprechenden kleineren Würfels sein.

[0048] Bei einer Ausführungsform sind die mehreren Orte über den imaginären Würfel **550** zufällig verteilt. In einigen Fällen ist die Steuerschaltung **111** konfiguriert, durch Teilen des imaginären Würfels **550** in mehrere nicht überlappende Regionen und durch Zuordnen eines entsprechenden Orts der mehreren Orte, sodass er sich in jeder Region der mehreren nicht überlappenden Regionen befindet, die mehreren Orte zu bestimmen, wobei der entsprechende Ort in einer bestimmten Region ein zufälliger Ort in dieser Region sein kann. In einigen Fällen kann die Steuerschaltung **111** konfiguriert sein, jede der halben Regionen rekursiv oder iterativ in kleinere halbe Regionen zu teilen und Orte unterschiedlichen halben Regionen zuzuweisen, sodass die mehreren Orte nicht um eine Region des imaginären Würfels **550** herum angehäuft sind.

[0049] Die Steuerschaltung kann zum Beispiel konfiguriert sein, die mehreren Orte über eine Reihe von Iterationen zu bestimmen, wobei ein erster Ort der mehreren Orte als irgendein Ort innerhalb des imaginären Würfels bestimmt wird und während einer ersten Iteration der Reihe von Iterationen bestimmt wird, wobei der imaginäre Würfel eine erste Region bildet, die verwendet wird, um die erste Iteration auszuführen. **Fig. 5D** veranschaulicht ein Beispiel eines ersten Orts **555A**, der in der ersten Iteration bestimmt wird. Bei diesem Beispiel werden entsprechende Orte für die verbleibenden Iterationen durch Ausführen des Folgenden für jede der verbleibenden Iterationen bestimmt: (a) Teilen einer Region, die verwendet wird, um eine vorhergehende Iteration auszuführen, in eine erste Region und eine zweite Region, die sich nicht überlappen, wobei jede der ersten Region und der zweiten Region eine Region ist, die verwendet wird, um eine gegenwärtige Iteration auszuführen, (b) Bestimmen, welche der ersten Region und der zweiten Region einen vorherigen Ort enthält, wobei der vorherige Ort ein entsprechender Ort der mehreren Orte ist, die in der vorhergehenden Iteration bestimmt wurden, (c) und Bestimmen eines Orts innerhalb der anderen von der ersten Region und der zweiten Region als einen gegenwärtigen Ort, wobei der gegenwärtige Ort ein Ort der mehreren Orte ist, der für die gegenwärtige Iteration bestimmt ist. **Fig. 5D** veranschaulicht zum Beispiel eine zweite Iteration, die eine in einer vorhergehenden Iteration (d. h. der ersten Iteration) verwendete Region in eine erste halbe Region **553A** und eine zweite halbe Region **553B** teilt. Da der Ort für die erste Iteration sich in der ersten halben Region **554A** befindet, befindet sich der Ort für die zweite Iteration ferner in der anderen, der zweiten halben Region **553B**. **Fig. 5E** veranschaulicht eine dritte Iteration, die eine in einer vorhergehenden Iteration verwendete Region **553A** in eine erste halbe Region **553C** und eine zweite halbe Region **553D** teilt. Da ein Ort **555A** von einer vorhergehenden Iteration sich in der halben Region **553D** befand, befindet sich der Ort **555C** für die dritte Iteration in der anderen halben Region **553C**. **Fig. 5F** veranschaulicht eine vierte Iteration, die eine in einer vorhergehenden Iteration verwendete Region **553B** in die halben Regionen **553E** und **553F** teilt. Da sich ein Ort einer vorhergehenden Iteration in der halben Region **553F** befand, befindet sich der Ort **555D** für die vierte Iteration in der anderen halben Region **553E**.

[0050] Unter erneuter Bezugnahme auf **Fig. 4** umfasst das Verfahren **400** einen Schritt **405**, in dem die Steuerschaltung **111** den Roboterarm steuern kann, um das Kalibrieremuster zu den mehreren in Schritt **403** bestimmten Orten zu bewegen. In Bezug auf **Fig. 5B** kann der Roboter **450** zum Beispiel den Roboterarm durch Bewegen des einen oder der mehreren Gelenke **454A** bis **454E** des Roboterarms bewegen. Die Steuerschal-

tung **111** kann z. B. einen oder mehrere Bewegungsbefehle erzeugen, die bewirken würden, dass der Roboter die mehreren Gelenke **454A** bis **454E** bewegt, und den einen oder die mehreren Bewegungsbefehle über die Kommunikationsschnittstelle **113** an den Roboter **450** ausgeben. Die Steuerschaltung **111** kann insbesondere den einen oder die mehreren Bewegungsbefehle an die Kommunikationsschnittstelle **113** ausgeben, die den einen oder die mehreren Bewegungsbefehle zu dem Roboter **450** kommunizieren kann, um zu bewirken, dass der Roboterarm (z. B. die mehreren Gelenke **454A** bis **454E**) das Kalibriermuster basierend auf dem einen oder den mehreren Bewegungsbefehlen zu den mehreren Orten bewegt, die an oder überall in dem imaginären Würfel verteilt sind. Bei einer Ausführungsform können der eine oder die mehreren Bewegungsbefehle einen oder mehrere Motorbefehle umfassen, die einen Drehbewegungsbetrag steuern, um den sich die Gelenke **454A** bis **454E** relativ zueinander drehen. Bei einer Ausführungsform kann die Steuerschaltung konfiguriert

sein, einen Ort als eine kartesische Koordinate $[XYZ]_{World}^T$ zu bestimmen und Motorbefehle basierend auf der kartesischen Koordinate zu bestimmen. Bei einer Ausführungsform kann die Steuerschaltung **111** konfiguriert sein, den Roboterarm (z. B. über Bewegungsbefehle, die dem Roboter **450** kommuniziert werden) zu steuern, um das Kalibriermuster **460** in unterschiedliche entsprechende Winkel relativ zur Kamera **470** für die mehreren Orte, die an oder überall in dem imaginären Würfel **550** verteilt sind, zu neigen, sodass mehrere entsprechende Kalibrierbilder das Kalibriermuster **460** in unterschiedlichen entsprechenden Winkeln relativ zur Kamera **470** erfassen.

[0051] Bei einer Ausführungsform umfasst das Verfahren **400** einen Schritt **407**, bei dem die Steuerschaltung **111** mehrere Kalibrierbilder von der Kamera **470** über die Kommunikationsschnittstelle **113** abrufen oder anderweitig empfangen kann, wobei die mehreren Kalibrierbilder durch die Kamera erfasst werden und entsprechende Bilder des Kalibrierusters **460** an den mehreren Orten der Schritte **403** und **405** sind. In einigen Fällen kann der Schritt **407** einbeziehen, dass die Steuerschaltung die Kamera steuert, um die mehreren entsprechenden Kalibrierbilder zu erfassen, die dem Kalibriermuster entsprechen, das an den mehreren Orten angeordnet ist. Die **Fig. 6A** bis **Fig. 6D** veranschaulichen beispielsweise ein Beispiel von vier entsprechenden Bildern des Kalibrierusters **460** von **Fig. 5A** an unterschiedlichen Orten und/oder in unterschiedlichen entsprechenden Winkeln relativ zur Kamera **470**. In einigen Fällen kann jedes Kalibrierbild der mehreren entsprechenden Kalibrierbilder ein Pixelarray mit entsprechenden Pixelintensitätswerten umfassen. Bei einer Ausführungsform kann eines oder mehrere der Kalibrierbilder eine Verzerrung zeigen, die sich durch eine Krümmung in oder unter Elementen des Kalibrierusters manifestierten kann, die tatsächlich gerade sind. Die Verzerrung wird nachstehend ausführlicher in Bezug auf **Fig. 8B** erörtert.

[0052] Bei einer Ausführungsform kann der Schritt **407** beinhalten, dass die Steuerschaltung ein Kalibrierbild durch Erzeugen eines Kamerabefehls und Kommunizieren des Kamerabefehls über die Kommunikationsschnittstelle **113** zu der Kamera abrufen. Wenn der Kamerabefehl durch die Kamera empfangen wurde, kann er bewirken, dass die Kamera das Kalibrierbild oder jedes andere Bild von dem Kamerasichtfeld erfasst, und/oder er kann bewirken, dass die Kamera ein erfasstes Bild zu der Kommunikationsschnittstelle **113** zurückkommuniziert, die dann das erfasste Bild zu der Steuerschaltung **111** kommunizieren kann. Die Steuerschaltung **111** kann daher infolgedessen das erfasste Kalibrierbild von der Kamera über die Kommunikationsschnittstelle **113** empfangen. Bei einer Ausführungsform kann die Steuerschaltung **111** ein erfasstes Bild von der Kamera empfangen, ohne einen Kamerabefehl zu erzeugen. Die Kamera kann zum Beispiel ein Kalibrierbild oder jedes andere Bild von ihrem Kamerasichtfeld periodisch oder als Reaktion auf eine definierte Triggerbedingung automatisch erfassen, ohne einen Kamerabefehl von der Steuerschaltung **111** zu benötigen. Bei einer derartigen Ausführungsform kann die Kamera auch konfiguriert sein, ohne einen Kamerabefehl von der Steuerschaltung **111** das Kalibrierbild zu der Kommunikationsschnittstelle **113** automatisch zu kommunizieren, die dann das Bild zu der Steuerschaltung **111** kommunizieren kann.

[0053] Unter erneuter Bezugnahme auf **Fig. 4** umfasst das Verfahren **400** einen Schritt **409**, bei dem die Steuerschaltung **111** entsprechende Abschätzungen der intrinsischen Kameraparameter basierend auf den mehreren entsprechenden Kalibrierbildern bestimmen kann. Das Verfahren **400** umfasst ferner einen Schritt **411**, bei dem die Steuerschaltung **111** basierend auf den entsprechenden Abschätzungen der intrinsischen Kameraparameter eine Abschätzung einer Transformationsfunktion bestimmt, die eine Beziehung zwischen einem Kamerakoordinatensystem und einem Weltkoordinatensystem beschreibt. Bei einer Ausführungsform können die Schritte **409** und **411** Teil einer intrinsischen Kalibrierphase und einer Hand-Auge-Kalibrierphase sein, die nachfolgend ausführlicher beschrieben werden. Bei einer Ausführungsform kann das Verfahren **400** einen Schritt **413** umfassen, bei dem die Steuerschaltung ein anschließendes Bild von der Kamera empfängt und eine Platzierung des Roboterarms durch Ausgeben eines anschließenden Bewegungsbefehls (z. B. über die Kommunikationsschnittstelle **113**) an den Roboter steuert, der auf dem anschließenden Bild und auf der Abschätzung der Transformationsfunktion basiert. Das anschließende Bild kann zum Beispiel ein Bild eines

Pakets oder anderen Objekts sein, das durch die Kamera (z. B. automatisch oder als Reaktion auf einen Kamerabefehl) erfasst wird. Bei einem Beispiel kann der Schritt **413** die Verwendung der Transformationsfunktion und des anschließenden Bildes einbeziehen, um eine Objekt-zu-Welt-Beziehung (z. B. eine Matrix T_{World}^{OBJECT}) zu bestimmen, und diese Beziehung kann verwendet werden, um einen Bewegungsbefehl zu erzeugen, der eine Platzierung des Roboterarms oder einer anderen Komponente des Roboters relativ zu dem Paket steuert.

[0054] Bei einer Ausführungsform kann der in Schritt **405** (in dem das Kalibriermuster zu Orten bewegt wird, die an oder überall in dem imaginären Würfel verteilt sind) verwendete imaginäre Würfel ein größter imaginärer Würfel sein, der in ein Kamerasichtfeld (z. B. 510) passen (z. B. vollständig passen) kann. Bei einer Ausführungsform wird der größte imaginäre Würfel in Schritt **405** verwendet, wenn (z. B. nur wenn) ein Roboterarm das Kalibriermuster zu allen Eckorten des imaginären Würfels bewegen kann. Anderweitig kann ein kleinerer imaginärer Würfel für den Schritt **405** verwendet werden. Bei einer Ausführungsform des Verfahrens **400** wird der Schritt **401** zum Beispiel vor dem Schritt **405** ausgeführt und bezieht ein, dass die Steuerschaltung **111** einen ersten imaginären Würfel bestimmt, der in das Kamerasichtfeld der Kamera passt. **Fig. 7** stellt ein Beispiel eines ersten imaginären Würfels **649** dar, der in einigen Fällen der größte imaginäre Würfel sein kann, der in das Kamerasichtfeld der Kamera passen kann. Die Steuerschaltung **111** kann dann bestimmen, ob der Roboterarm (z. B. des Roboters **450**) das Kalibriermuster zu allen Eckorten des ersten imaginären Würfels bewegen kann. Wenn der Roboterarm fähig ist, dies zu tun, kann der erste imaginäre Würfel dann in den Schritten **403** und **405** als der imaginäre Würfel verwendet werden.

[0055] In einigen Fällen kann die Steuerschaltung **111** bestimmen, dass der Roboterarm das Kalibriermuster nicht zu einem oder mehreren Eckorten des ersten imaginären Würfels **649** bewegen kann. Die Steuerschaltung **111** kann zum Beispiel bestimmen, dass der Roboterarm ein Kalibriermuster zu nur sechs Eckorten des ersten imaginären Würfels **649** bewegen kann und unfähig sein kann, das Kalibriermuster zu einem siebten Eckort oder achten Eckort des ersten imaginären Würfels **649** zu bewegen. Solch eine Bestimmung reflektiert eine Möglichkeit, dass das Kalibriermuster nicht nahe dem siebten Eckort und dem achten Eckort angeordnet werden kann. Wenn bei einer derartigen Situation der erste imaginäre Würfel **649** verwendet wird, um Orte zu bestimmen, an denen das Kalibriermuster durch die Kamera fotografiert wird, kann die Kamera unfähig sein, Kalibrierbilder des Kalibrierusters nahe dem siebten Eckort und dem achten Eckort zu erfassen, da das Kalibriermuster nicht nahe daran heranbewegt werden kann. Diese Situation kann die Diversität von Kalibrierbildern reduzieren, die für eine Kamerakalibrierung verfügbar sind, was eine Genauigkeit oder Robustheit der Kamerakalibrierung reduzieren kann. Die Steuerschaltung **111** kann daher als Reaktion auf eine Bestimmung, dass der Roboterarm unfähig ist, das Kalibriermuster zu mindestens einem Eckort des ersten imaginären Würfels **649** zu bewegen, einen zweiten imaginären Würfel **650** bestimmen, der kleiner ist als der erste imaginäre Würfel **649** (z. B. 20 % kleiner). Wenn der Roboterarm das Kalibriermuster zu allen Eckorten des zweiten imaginären Würfels **650** bewegen kann, dann kann der zweite imaginäre Würfel **650** als der imaginäre Würfel der Schritte **403** und **405** verwendet werden.

[0056] Bei einer Ausführungsform kann die Steuerschaltung basierend auf dem Detektieren, ob ein physischer Gegenstand (z. B. ein Stromkabel) einen Weg von dem Roboterarm zu diesem Ort blockiert, bestimmen, ob der Roboterarm das Kalibriermuster zu einem bestimmten Ort bewegen kann. Bei einer Ausführungsform kann es einige Orte geben, bei denen der Roboterarm einfach unfähig ist, sie zu erreichen, da sie von einer Basis des Roboters zu weit entfernt sind oder weil der Roboterarm durch seinen physischen Aufbau darin eingeschränkt ist, sich zu diesem Ort zu bewegen. Der Roboterarm kann zum Beispiel durch eine Größe von einem oder mehreren Gelenken, die den Roboterarm bilden, eine Ausrichtung der einen oder der mehreren Gelenke, wie viele Freiheitsgrade durch Verbindungen bereitgestellt werden, die das eine oder die mehreren Gelenke verbinden, oder eine andere Einschränkung eingeschränkt sein. Bei einer Ausführungsform kann die Steuerschaltung die vorstehende Bestimmung durchführen, ohne den Roboterarm tatsächlich zu bewegen. Bei einer weiteren Ausführungsform kann die Steuerschaltung die vorstehende Bestimmung durch den tatsächlichen Versuch, den Kalibrierarm über den Roboterarm zu dem bestimmten Ort zu bewegen, und das Bestimmen, ob solch ein Versuch erfolgreich ist, durchführen.

[0057] Bei einer Ausführungsform wird ein bestimmter imaginärer Würfel für den Schritt **405** verwendet, wenn der Roboterarm das Kalibriermuster an jedem Eckort neigen kann, sodass es sich innerhalb eines definierten Winkelbereichs relativ zur Kamera befindet. In einigen Fällen wird der bestimmte imaginäre Würfel nur für den Schritt **405** verwendet, wenn die vorstehend genannte Bedingung erfüllt ist. Die Kamerakalibrierung kann zum Beispiel nur Kalibrierbilder verwenden, bei denen sich ein Winkel zwischen den Kalibriermustern und der Kamera in einem Bereich von 0 bis 45 Grad befindet. Bei einer Ausführungsform kann daher der Schritt **401** das Bestimmen durch die Steuerschaltung **111** einbeziehen, ob der Roboterarm das Kalibriermuster zu allen

Eckorten des ersten imaginären Würfels **649** bewegen kann und ob er an jedem Eckort von allen Eckorten des ersten imaginären Würfels **649** das Kalibriermuster in einen Winkel neigen kann, der sich relativ zur Kamera innerhalb eines definierten Winkelbereichs befindet. Wenn die Steuerschaltung bestimmt, dass der Roboterarm unfähig ist, das Kalibriermuster zu einem oder mehreren Eckorten des ersten imaginären Würfels **649** zu bewegen, oder dass der Roboterarm unfähig ist, für mindestens einen Eckort des ersten imaginären Würfels **649** das Kalibriermuster in einen Winkel zu neigen, der sich relativ zur Kamera innerhalb der definierten Winkelbereiche befindet, kann die Steuerschaltung **111** alle Eckorte des zweiten imaginären Würfels **650** bestimmen. Der zweite imaginäre Würfel **650** kann für den Schritt **405** verwendet werden, wenn die vorstehenden Bedingungen erfüllt sind.

[0058] Bei einer Ausführungsform kann die Steuerschaltung **111** konfiguriert sein, einen Wert eines Bildschärfeparameters und einen Wert eines Belichtungsparameters basierend auf einem Bild des Kalibrierusters zu bestimmen. In einigen Fällen kann diese Bestimmung vor dem Schritt **401** ausgeführt werden. Die Steuerschaltung **111** kann zum Beispiel konfiguriert sein, die Kamera zu steuern, ein erstes Kalibrierbild des Kalibrierusters vor dem Schritt **401** zu erfassen und ein Intensitätsniveau und ein Kontrastniveau von mindestens einem Musterelement (z. B. einem Punkt) des Kalibrierusters zu bestimmen. Die Steuerschaltung **111** kann konfiguriert sein, entsprechende Werte des Belichtungsparameters (z. B. eine Öffnung, Verschlusszeit oder ISO) und einen Bildschärfeparameter der Kamera basierend auf mindestens einem von dem Intensitätsniveau und dem Kontrastniveau von mindestens einem von den Musterelementen in dem ersten Kalibrierbild zu bestimmen. Die entsprechenden Werte dieser Parameter können dann von der Kamera verwendet werden, um bei Schritt **407** Kalibrierbilder des Kalibrierusters zu erfassen.

[0059] Wie vorstehend beschrieben, kann die Kamerakalibrierung auf Kalibrierbildern, wie beispielsweise Bildern des Kalibrierusters **460**, basieren. Bei einer Ausführungsform kann das Kalibriermuster **460** auf eine flache Kalibriertafel gedruckt sein. Die Kalibriertafel kann aus einem Material gebildet sein, das gegenüber temperaturbedingter Krümmung beständig ist, wie beispielsweise Kohlenstofffasern. **Fig. 8A** stellt ein Beispiel des Kalibrierusters **460** dar, das mehrere der Musterelemente **461₁** bis **461₂₅** umfassen kann, die entlang imaginärer gerader Gitterlinien (**463₁** bis **463₅** und **465₁** bis **465₅**) eines rechteckigen Gitters angeordnet sind. Die imaginären Gitterlinien können beispielsweise einen ersten Satz von geraden Linien mit den gleichen Abständen **463₁** bis **463₅** und einen zweiten Satz von geraden Linien mit den gleichen Abständen **465₁** bis **465₅** umfassen, wobei der erste Satz imaginärer Gitterlinien **463₁** bis **463₅** zu dem zweiten Satz imaginärer Gitterlinien **465₁** bis **465₅** orthogonal ist. Bei einer Ausführungsform kann jedes der Musterelemente **461₁** bis **461₂₅** ein kreisförmiger Punkt sein. Bei einer Ausführungsform können sich die Musterelemente **461₁** bis **461₂₅** in der Größe unterscheiden. Die Musterelemente **461₈**, **461₁₃** und **461₁₄** weisen zum Beispiel einen ersten Durchmesser auf, während alle verbleibenden Musterelemente einen zweiten Durchmesser aufweisen, der kleiner ist als der erste Durchmesser. Bei einer Ausführungsform weisen die mehreren Musterelemente **461₁** bis **461₂₅** eine definierte Größe bzw. Größen und einen definierten Abstand dazwischen auf. Der erste Durchmesser und der zweite Durchmesser können zum Beispiel Werte sein, die durch einen Hersteller des Kalibrierusters **460** (z. B. einem Kalibriertafelhersteller) definiert sind, und sie können während der Kamerakalibrierung ein bekannter Wert sein. Ferner können die mehreren Musterelemente **461₁** bis **461₂₅** einen definierten Abstand Δd_1 entlang der Gitterlinien **465₁** bis **465₅** aufweisen und einen definierten Abstand Δd_2 entlang der Gitterlinien **463₁** bis **463₅** aufweisen, wobei die definierten Abstände während der Kamerakalibrierung bekannte Werte sein können. Bei einer Ausführungsform ist Δd_1 gleich Δd_2 . Bei einer Ausführungsform können die Musterelemente **461₁** bis **461₂₅** alle die gleiche Größe aufweisen (z. B. gleichen Durchmesser) und das Kalibriermuster **460** kann ferner ein Merkmal (z. B. eine rotationsasymmetrische Form) umfassen, das eine Ausrichtung des Kalibrierusters **460** anzeigt.

[0060] Das Musterkoordinatensystem kann wie vorstehend angegeben in Bezug auf ein Kalibriermuster, wie beispielsweise das Kalibriermuster **460**, definiert sein. Bei einer Ausführungsform kann ein Musterelement an oder nahe einer Mitte des Kalibrierusters **460**, wie beispielsweise das Musterelement **461₁₃**, einen Ursprung des Kalibrierkoordinatensystems definieren. Bei dieser Ausführungsform kann die Achse $\vec{X}_{Pattern}$ mit den imaginären Gitterlinien **463₁** bis **463₅** ausgerichtet sein, während die $\vec{X}_{Pattern}$ - Achse mit den imaginären Gitterlinien **465₁** bis **465₅** ausgerichtet sein kann, und die Achse $\vec{Z}_{Pattern}$ ist zu einer durch das Kalibriermuster **460** gebildeten Ebene orthogonal ausgerichtet.

[0061] Während die Musterelemente entlang gerader imaginärer Linien angeordnet sind, können sie in einem Kalibrierbild aufgrund eines Linsenverzerrungseffekts wie auf einer gekrümmten Bahn angeordnet erscheinen. **Fig. 8B** stellt beispielsweise ein Beispiel eines Kalibrierbilds für das Kalibriermuster **460** dar, bei dem das

Kalibrierbild einen Linsenverzerrungseffekt umfasst. Während zum Beispiel die Musterelemente in dem Kalibriermuster **460** entlang gerader Linien eines rechteckigen Gitters angeordnet sind, kann die Linsenverzerrung bewirken, dass sie so erscheinen, als wären sie entlang einer gekrümmten Bahn angeordnet. Wie nachfolgend ausführlicher beschrieben, kann die Kamerakalibrierung eine Abschätzung eines Verzerrungsparameters oder eines Satzes von Verzerrungsparametern basierend auf dem Detektieren einer Krümmung in dem Kalibrierbild bestimmen.

[0062] Wie vorstehend angegeben, kann ein Aspekt der Kamerakalibrierung eine intrinsische Kalibrierphase einbeziehen (was auch als Ausführen einer intrinsischen Kalibrierung bezeichnet wird), die nachfolgend erörtert wird. Bei einer Ausführungsform kann die intrinsische Kalibrierung das Bestimmen entsprechender Abschätzungen für die intrinsischen Kameraparameter der Kamera **170/370/470** von **Fig. 1A/Fig. 3B/Fig. 5A**, wie beispielsweise Verzerrungsparameter und eine Projektionsmatrix, umfassen.

[0063] Bei einer Ausführungsform kann die Projektionsmatrix ein intrinsischer Kameraparameter sein, dessen Wert eine aus Skalarwerten gebildete Matrix ist. Die Projektionsmatrix K einer Kamera **170/370/470** kann zum Beispiel als eine aus 9 Skalarwerten gebildete 3×3 -Matrix definiert sein. Wie vorstehend angegeben, ist ein Beispiel der Projektionsmatrix:

$$K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & C_x \\ 0 & f_y & C_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

[0064] Bei einer Ausführungsform definiert die Projektionsmatrix eine lineare Transformation oder eine andere Zuordnung, die eine Koordinate $[XYZ]_{Camera}^T$ eines Musterelements innerhalb des Kamerasichtfelds der Kamera zu einer Pixelkoordinate $[uv]^T_{Sensor}$ projiziert, an der das Musterelement in einem Kalibrierbild erscheinen wird:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} X/Z \\ Y/Z \\ 1 \end{bmatrix},$$

[0065] Die vorstehende Beziehung kann annehmen, dass es keine Linsenverzerrung gibt. Bei dem vorstehenden Beispiel ist der Vektor $[X/Z/Y/Z/1]^T$ eine homogene 3D-Koordinate in dem Kamerakoordinatensystem und der Vektor $[u \ v \ 1]^T$ eine homogene 3D-Koordinate in dem Bildsensorkoordinatensystem.

[0066] Bei einer Ausführungsform kann die Pixelkoordinate $[uv]^T_{Sensor}$ eines Musterelements eine Abschätzung einer Mitte des Musterelements in dem Kalibrierbild bezeichnen. Wenn das Musterelement zum Beispiel als ein kreisförmiger Punkt in dem Kalibrierbild erscheint, kann die Pixelkoordinate eine Mitte des kreisförmigen Punkts sein. In einigen Situationen kann das Musterelement in dem Kalibrierbild als eine Ellipse erscheinen, obwohl es tatsächlich ein kreisförmiger Punkt auf dem Kalibriermuster ist. Der Grund für dieses Erscheinungsbild kann ein Winkel zwischen der Kamera und dem Kalibriermuster sein. In diesen Situationen kann die Pixelkoordinate des Musterelements geringfügig von einer geometrischen Mitte der Ellipse abweichen.

[0067] Bei einer Ausführungsform kann jedes von f_x , f_y , C_x und C_y eine Komponente der Projektionsmatrix und auch ein intrinsischer Kameraparameter sein, dessen Wert ein Skalarwert ist. Wie vorstehend angegeben, können die Parameter f_x und f_y Skalierungsfaktoren sein, die auf einer Brennweite der Kamera und einer Pixelgröße eines Bildsensors in einer X- oder Y-Richtung basieren. Die Parameter C_x und C_y können Pixelkoordinaten einer im Bildsensorkoordinatensystem ausgedrückten Bildmitte sein.

[0068] Bei einer Ausführungsform kann ein Verzerrungsparameter ein Parameter einer Verzerrungsfunktion sein. Die Linsenverzerrung einer Kamera kann insbesondere als eine oder mehrere Funktionen d_x und d_y modelliert werden, was ein Musterelement schafft, das sich tatsächlich bei $[XYZ]_{Camera}^T$ in dem Sichtfeld der

Kamera befindet, so erscheinen lässt, als ob sich das Musterelement bei $[\hat{X}\hat{Y}\hat{Z}]_{Camera}^T$ befindet. In diesem Modell wird die Projektionsmatrix K auf $[\hat{X}\hat{Y}\hat{Z}]_{Camera}^T$ anstatt auf $[XYZ]_{Camera}^T$ angewandt. Dieses Phänomen kann ausgedrückt werden als:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} \hat{X} \\ \hat{Y} \\ 1 \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} d_x(\tilde{X}, \tilde{Y}) \\ d_y(\tilde{X}, \tilde{Y}) \\ 1 \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} d_x(X/Z, Y/Z) \\ d_y(X/Z, Y/Z) \\ 1 \end{bmatrix}$$

[0069] In dem vorstehenden Beispiel sind X/Z und Y/Z vereinfacht als $\tilde{X}$ und $\tilde{Y}$ geschrieben. Eine nicht lineare Verzerrungsfunktion d_x kann $\hat{X}$ als eine Funktion von $\tilde{X}$ und $\tilde{Y}$ bestimmen und eine nicht lineare Verzerrungsfunktion d_y kann $\hat{Y}$ als eine Funktion von $\tilde{X}$ und $\tilde{Y}$ bestimmen. In einigen Fällen kann ein intrinsischer Kameraparameter ein Parameter in der Verzerrungsfunktion d_x oder d_y sein, wobei in diesem Fall der intrinsische Kameraparameter als ein Verzerrungsparameter bezeichnet werden kann.

[0070] Bei einer Ausführungsform können die Verzerrungsfunktionen auf einem Polynomverzerrungsmodell basieren, bei dem

$$\hat{X} = d_x(\tilde{X}, \tilde{Y}) = \tilde{X} \left(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 \right) + 2p_1 \tilde{X} \tilde{Y} + p_2 \left(r^2 + 2\tilde{X}^2 \right)$$

$$\tilde{Y} = d_y(\tilde{X}, \tilde{Y}) = \tilde{Y} \left(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 \right) + 2p_2 \tilde{X} \tilde{Y} + p_1 \left(r^2 + 2\tilde{Y}^2 \right)$$

[0071] In dem vorstehenden Beispiel ist $r^2 = \tilde{X}^2 + \tilde{Y}^2$. Ferner können die intrinsischen Kameraparameter bei diesem Beispiel k_1, k_2, k_3, p_1, p_2 umfassen, wobei jeder davon insbesondere als ein Verzerrungsparameter bezeichnet werden kann. In einigen Fällen können einige oder alle der Verzerrungsparameter einen Wert aufweisen, der ein Skalarwert ist.

[0072] Bei einer Ausführungsform können die Verzerrungsfunktionen auf einem rationalen Verzerrungsmodell basieren, bei dem

$$\hat{X} = d_x(\tilde{X}, \tilde{Y}) = \tilde{X} \left(\frac{1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6}{1 + k_4 r^2 + k_5 r^4 + k_6 r^6} \right) + 2p_1 \tilde{X} \tilde{Y} + p_2 \left(r^2 + 2\tilde{X}^2 \right)$$

$$\tilde{Y} = d_y(\tilde{X}, \tilde{Y}) = \tilde{Y} \left(\frac{1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6}{1 + k_4 r^2 + k_5 r^4 + k_6 r^6} \right) + 2p_2 \tilde{X} \tilde{Y} + p_1 \left(r^2 + 2\tilde{Y}^2 \right)$$

[0073] Bei dem vorstehenden Beispiel ist $r^2 = \tilde{X}^2 + \tilde{Y}^2$ und jedes von $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, p_1$ und p_2 ein intrinsischer Kameraparameter und insbesondere ein Verzerrungsparameter.

[0074] Bei einer Ausführungsform können die Verzerrungsfunktionen auf einem Sichtfeld-Modell basieren, bei dem:

$$\tilde{X} = d_x(\tilde{X}) = \frac{\tilde{X} \tan(r \tan(\omega))}{\tan(\omega)}$$

$$\tilde{Y} = d_Y(\tilde{Y}) = \frac{\tilde{Y} \tan(r \tan(\omega))}{\tan(\omega)}$$

[0075] Bei dem vorstehenden Beispiel ist ω ein intrinsischer Kameraparameter und insbesondere ein Verzerrungsparameter, dessen Wert ein Skalarwert ist.

[0076] Wie nachfolgend ausführlicher beschrieben, können einige Instanzen der intrinsischen Kalibrierphase das Bestimmen einer Abschätzung eines Verzerrungsparameters einbeziehen, wobei die Abschätzung ein Wert sein kann, der, wenn er angewandt wird, um die Verzerrungsfunktionen d_x^{-1} und d_y^{-1} umzukehren, einen Linsenverzerrungseffekt kompensieren kann. Wenn die inverse Verzerrungsfunktion zum Beispiel mit der Abschätzung des Verzerrungsparameters angewandt wird, kann sie ein Bild, das eine Krümmung aufweist (z. B. das Bild in **Fig. 8B**), in ein „unverzerrtes“ Bild umwandeln, das die Krümmung reduziert oder eliminiert.

[0077] Die **Fig. 9A** und **Fig. 9B** stellen ein Ablaufdiagramm eines beispielhaften Verfahrens **900** zum Ausführen einer Kamerakalibrierung dar, wobei die Kamerakalibrierung eine intrinsische Kalibrierphase umfassen kann. Das Verfahren kann Schätzwerte von unterschiedlichen intrinsischen Kameraparametern bei unterschiedlichen Stufen bestimmen. Das Verfahren **900** kann durch z. B. die Steuerschaltung **111** von **Fig. 1A** des Robotersteuersystems **110** von **Fig. 1A** ausgeführt werden. Wie vorstehend beschrieben, kann das Robotersteuersystem **110** in Kommunikation mit einem Roboter und einer Kamera sein, wie beispielsweise dem Roboter **450** von **Fig. 5A** und der Kamera **470** von **Fig. 5A** mit dem Kamerasichtfeld **510**. Der Roboter **450** kann einen Roboterarm aufweisen, auf dem ein Kalibriermuster, wie beispielsweise das Kalibriermuster **460** von **Fig. 5A**, angeordnet ist. Das Kalibriermuster **460** umfasst mehrere Musterelemente **461₁** bis **461₂₅** von **Fig. 8A** mit entsprechend definierten Musterelementorten (z. B. Musterkoordinaten) in einem Musterkoordinatensystem, wie beispielsweise das in den **Fig. 3C** und **Fig. 8A** dargestellten. Das Musterkoordinatensystem kann ein Koordinatensystem sein, das in Bezug auf einen Ort und eine Ausrichtung des Kalibriermusters **460** definiert ist. Wie in **Fig. 8A** veranschaulicht, ist das Musterkalibriersystem zum Beispiel durch die Koordinatenachsen $\tilde{X}_{Pattern}$, $\tilde{Y}_{Pattern}$ und $\tilde{Z}_{Pattern}$ definiert. Bei einer Ausführungsform ist das Musterelement **461₁₃** ein Ursprung des Musterkalibriersystems und sein definierter Musterelementort ist die Musterkoordinate $[0 \ 0 \ 0]^T_{Pattern}$. Bei dieser Ausführungsform ist der definierte Musterelementort des Musterelements **461₁₄** beispielsweise $[d_1 \ 0 \ 0]^T_{Pattern}$, wobei d_1 ein definierter Wert ist, der bekannt ist. Als ein weiteres Beispiel ist der definierte Musterelementort des Musterelements **461₈** $[0 \ d_2 \ 0]^T_{Pattern}$.

[0078] Bei einer Ausführungsform kann das Verfahren **900** mit Schritt **901** beginnen, bei dem die Steuerschaltung **111** den Roboterarm steuern kann, das Kalibriermuster (z. B. **460**) zu mindestens einem Ort innerhalb eines Kamerasichtfelds (z. B. **510** von **Fig. 5B**) zu bewegen, wobei das Kamerasichtfeld ein Sichtfeld der Kamera (z. B. **470**) bezeichnen kann. In einigen Fällen kann Schritt **901** einbeziehen, dass die Steuerschaltung **111** einen Bewegungsbefehl zum Ausgeben an die Kommunikationsschnittstelle **113** des Robotersteuersystems **110** erzeugt und den Bewegungsbefehl an die Kommunikationsschnittstelle **113** ausgibt. Die Kommunikationsschnittstelle **113** kann den Bewegungsbefehl zum Roboter kommunizieren, wobei der Bewegungsbefehl bewirken kann, dass der Roboterarm das Kalibriermuster zu dem mindestens einen Ort in dem Kamerasichtfeld bewegt. Bei einer Ausführungsform kann Schritt **901** auf eine zu den Schritten **401** bis **405** von **Fig. 4** ähnliche Weise ausgeführt werden.

[0079] In Schritt **902** ruft die Steuerschaltung **111** ein Kalibrierbild von der Kamera über die Kommunikationsschnittstelle **113** ab oder empfängt es anderweitig, wobei das Kalibrierbild durch die Kamera erfasst wird und ein Bild des Kalibriermusters an dem mindestens einen Ort ist. Bei einer Ausführungsform kann Schritt **902** auf eine dem Schritt **407** ähnliche Weise ausgeführt werden. Bei einer Ausführungsform kann Schritt **902** einbeziehen, dass die Steuerschaltung **111** die Kamera über einen Kamerabefehl steuert, um ein Kalibrierbild zu erfassen, das dem Kalibriermuster entspricht und sich bei dem mindestens einen Ort befindet, wie beispielsweise eines der Kalibrierbilder in den **Fig. 6A** bis **Fig. 6D** oder in **Fig. 8B**.

[0080] In Schritt **903** kann die Steuerschaltung **111** mehrere Bildmusterelementorte (auch als erfasste Musterelementorte bezeichnet) bestimmen, die entsprechende Orte anzeigen, an denen die mehreren Musterelemente in einem Kalibrierbild erscheinen. Jedes der Musterelemente kann beispielsweise ein kreisförmiger

Punkt sein und ein erfasster Elementort eines bestimmten kreisförmigen Punkts kann eine Pixelkoordinate $[u \ v]^T$ sein, an welcher der kreisförmige Punkt in dem Kalibrierbild erscheint, und kann insbesondere eine abgeschätzte Pixelkoordinate einer Mitte des kreisförmigen Punkts sein.

[0081] In Schritt **905** kann die Steuerschaltung **111** eine erste Abschätzung eines ersten intrinsischen Kameraparameters der Kamera basierend auf den mehreren Bildmuster-elementorten (z. B. einem Satz von $[u \ v]^T$

Koordinaten) und basierend auf den definierten Musterelementorten (z. B. einem Satz von $[X' \ Y' \ Z']_{Pattern}^T$ Koordinaten) bestimmen. In einigen Fällen umfasst die Kamera eine Linse und einen Bildsensor und der erste intrinsische Kameraparameter kann eine Projektionsmatrix sein, die eine Bildprojektion auf den Bildsensor beschreibt. Der erste intrinsische Kameraparameter kann beispielsweise die Projektionsmatrix K sein. In einigen Fällen kann der erste intrinsische Kameraparameter eine Komponente der Projektionsmatrix K sein, wie beispielsweise einer der Parameter f_x , f_y , C_x und C_y .

[0082] Wie vorstehend angegeben, kann die Projektionsmatrix K basierend auf entsprechenden bekannten

Koordinaten von $[X' \ Y' \ Z']_{Pattern}^T$ von verschiedenen Musterelementen und auf entsprechenden bekannten $[u \ v]^T$ Koordinaten abgeschätzt werden, an denen die verschiedenen Musterelemente in einem Kalibrierbild des

Kalibriermusters erscheinen. Bei einer Ausführungsform kann $[u \ v]^T$ mit $K * T_{Camera}^{Pattern} [X' \ Y' \ Z']_{Pattern}^T$ in Zusam-

menhang stehen. Bei dieser Ausführungsform kann $T_{Camera}^{Pattern}$ eine lineare Transformation sein, die eine Beziehung zwischen dem Musterkoordinatensystem und einem Kamerakordinatensystem beschreibt, wie beispielsweise dem in den **Fig. 3B** und **Fig. 3C** dargestellten. Es kann zum Beispiel die Beziehung reflektieren, dass:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}_{Camera} = T_{camera}^{pattern} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \\ 1 \end{bmatrix}_{Pattern}$$

[0083] In einigen Fällen kann $T_{camera}^{pattern}$ eine Drehmatrix R und einen Translationsvektor t umfassen. Es kann zum Beispiel als eine 4x4-Matrix geschrieben werden mit der Form

$$T_{camera}^{pattern} = \begin{bmatrix} R_{camera}^{pattern} & t_{camera}^{pattern} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

[0084] Bei einer Ausführungsform kann Schritt **905** das Lösen für K und $T_{Camera}^{Pattern}$ basierend auf mehreren

Pixelkoordinaten $[u \ v]^T$ und ihren entsprechenden Koordinaten $[X' \ Y' \ Z']_{Pattern}^T$ einbeziehen. Bei einer Ausführ-

ungsform kann der perspective-n-point-Algorithmus verwendet werden, um eine Abschätzung von $T_{Camera}^{Pattern}$ zu bestimmen. Bei einer Ausführungsform kann dieser Schritt auch eine Linsenverzerrung berücksichtigen und eine Abschätzung eines Verzerrungsparameters bestimmen. Dieser geschätzte Wert kann jedoch verworfen werden, nachdem Schritt **905** ausgeführt wurde, oder er wird genereller in den anderen Schritten des Verfahrens **900** nicht verwendet. Bei einer Ausführungsform kann Schritt **905** basierend auf einem Kamerakalibrierungsalgorithmus ausgeführt werden, der in „A Flexible New Technique for Camera Calibration,“ Technical Report MSR-TR-98-71, von Zhengyou Zhang (der auch als Algorithmus von Zhang bezeichnet wird) beschrieben wird, wobei die Offenbarung hierin durch Bezugnahme vollständig aufgenommen wird. Der Algorithmus

von Zhang kann insbesondere in der Lage sein, die Koordinaten $[u \ v]^T$ und $[X' \ Y' \ Z']_{Pattern}^T$ zu verwenden, um

eine Abschätzung einer Projektionsmatrix K , eine Abschätzung der $T_{Camera}^{Pattern}$ - Matrix und eine Abschätzung eines Verzerrungsparameters oder Satzes von Verzerrungsparametern zu bestimmen. Bei diesem Beispiel kann die Abschätzung der Projektionsmatrix K für die Schritte **907** verwendet werden, was nachstehend aus-

föhrlicher beschrieben wird, während der geschätzte Wert von $T_{Camera}^{Pattern}$ und/oder die Abschätzung des bzw.

der Verzerrungsparameter verworfen werden kann oder alternativ auch eine oder mehrere der vorstehenden Abschätzungen als eine anfängliche Schätzung eines Parameterwerts in Schritt **907** verwendet werden kann, wie es nachfolgend ausführlicher beschrieben wird.

[0085] In Schritt **907** kann die Steuerschaltung eine erste Abschätzung eines bzw. von zweiten intrinsischen Kameraparametern der Kamera basierend auf der ersten Abschätzung des ersten intrinsischen Kameraparameters und basierend auf den mehreren Bildmustererelementorten (die auch als erfasste Musterelementorte bezeichnet werden) bestimmen. In einigen Fällen kann der zweite intrinsische Kameraparameter ein Verzerrungsparameter sein, der eine durch die Linse bewirkte Verzerrung beschreibt. Wie vorstehend beschrieben, kann der zweite intrinsische Kameraparameter beispielsweise ein Verzerrungsparameter sein, der für die nicht linearen Verzerrungsfunktionen d_x und d_y verwendet wird.

[0086] Bei einer Ausführungsform kann die Steuerschaltung in Schritt **907** die erste Abschätzung des bzw. der zweiten intrinsischen Kameraparameter (z. B. des bzw. der Verzerrungsparameter) bestimmen durch: (a) Bestimmen einer anfängliche Abschätzung des bzw. der zweiten intrinsischen Kameraparameter, (b) Erzeugen, basierend auf der anfänglichen Abschätzung des bzw. der zweiten intrinsischen Kameraparameter und auf der ersten Abschätzung der Projektionsmatrix und dem Kalibrierbild: einer modifizierten Version des Kalibrierbilds, das die durch die Linse bewirkte Verzerrung kompensiert, (c) Bestimmen eines Krümmungsbetrags in der modifizierten Version des Kalibrierbilds, (d) Anpassen der anfänglichen Abschätzung des zweiten intrinsischen Kameraparameters basierend auf dem Krümmungsbetrag in der modifizierten Version des Kalibrierbilds, um eine angepasste Abschätzung des zweiten intrinsischen Kameraparameters zu erzeugen, der den Krümmungsbetrag reduziert, wobei die angepasste Abschätzung die erste Abschätzung des zweiten intrinsischen Kameraparameters ist. Bei einer Ausführungsform kann die anfängliche Abschätzung für den zweiten intrinsischen Kameraparameter einen Nullwert oder einen Satz von Nullwerten aufweisen (z. B. sind k_1 , k_2 , k_3 , p_1 , and/or p_2 in den vorstehenden Verzerrungsfunktionen gleich Null). Bei einer Ausführungsform kann die anfängliche Abschätzung für den zweiten intrinsischen Kameraparameter von einem Resultat von Schritt **905** erlangt werden. Wenn zum Beispiel Schritt **905** den Algorithmus von Zhang verwendet, kann der Algorithmus eine Abschätzung für den zweiten intrinsischen Kameraparameter ausgeben und diese ausgegebene Abschätzung kann in Schritt **907** als die anfängliche Abschätzung des zweiten intrinsischen Kameraparameters eingegeben werden.

[0087] Bei einer Ausführungsform kann die modifizierte Version des Kalibrierbilds eine Version sein, die versucht, eine Linsenverzerrung in dem Kalibrierbild zu kompensieren. Die modifizierte Version kann zum Beispiel

durch Anwenden der inversen Verzerrungsfunktion d_x^{-1} und d_y^{-1} auf das Kalibrierbild erzeugt werden. Bei einem Beispiel kann das durch die Kamera erfasste Kalibrierbild durch die Pixelkoordinaten $[u, v]^T$ dargestellt werden, die Orte darstellen, an denen Musterelemente in dem Kalibrierbild erscheinen, während die modifizierte Version des Kalibrierbilds durch die Pixelkoordinaten $[\tilde{u}, \tilde{v}]^T$ dargestellt werden kann, die Orte darstellen, an denen die gleichen Musterelemente in der modifizierten Version erscheinen. Bei diesem Beispiel können die Pixelkoordinaten $[\tilde{u}, \tilde{v}]^T$ durch eine Abschätzung der Projektionsmatrix K und der inversen Verzerrungsfunktionen berechnet werden. Wie vorstehend beschrieben, kann die Abschätzung der Projektionsmatrix insbesondere verwendet werden, um eine inverse Projektionsmatrix zu bestimmen, die verwendet werden kann zum Bestimmen von

$$\begin{bmatrix} \hat{X} \\ \hat{Y} \\ 1 \end{bmatrix} = K^{-1} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix}$$

[0088] Ferner kann wie vorstehend beschrieben das vorstehende Resultat auf die inverse Verzerrung angewandt werden zum Bestimmen von:

$$\hat{X} = d_x^{-1}(\hat{X}, \hat{Y})$$

$$\hat{Y} = d_y^{-1}(\hat{X}, \hat{Y})$$

[0089] Bei dem vorstehenden Beispiel beziehen sich $\hat{X}$ und $\hat{Y}$ für ein Musterelement darauf, wo das Musterelement im Sichtfeld der Kamera zu sein scheint, wenn eine Linsenverzerrung angewandt wird, und $\tilde{X}$ und $\tilde{Y}$ beziehen sich darauf, wo das Musterelement im Sichtfeld der Kamera zu sein scheint, wenn es eine Kompensation gegenüber der Linsenverzerrung gibt. Die Projektionsmatrix kann auf $\tilde{X}$ und $\tilde{Y}$ angewandt werden, um die Pixelkoordinaten $[\tilde{u} \ \tilde{v}]^T$ zu bestimmen basierend auf der Beziehung:

$$\begin{bmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \\ 1 \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} \tilde{X} \\ \tilde{Y} \\ 1 \end{bmatrix}$$

[0090] Bei dem vorstehenden Beispiel kann die inverse Verzerrungsfunktion einen oder mehrere Verzerrungsparameter umfassen. Die Abschätzung für den einen oder die mehreren Verzerrungsparameter kann optimiert werden, um gegenüber einer Linsenverzerrung bestmöglich zu kompensieren. Insbesondere kann die Abschätzung entsprechend einen oder mehrere Schätzwerte für den einen oder die mehreren Verzerrungsparameter einbeziehen und optimiert werden, um einen Verzerrungsbetrag in der modifizierten Version des Kalibrierbilds zu minimieren oder anderweitig zu reduzieren. Die Steuerschaltung **111** kann zum Beispiel unterschiedliche Abschätzungen für den einen oder die mehreren Verzerrungsparameter versuchen, um unterschiedliche modifizierte Versionen des Kalibrierbilds zu erzeugen und zu bewerten, welche Abschätzung den Krümmungsbetrag in der modifizierten Version des Kalibrierbilds minimiert, wobei der Krümmungsbetrag als eine Krümmungspunktzahl bestimmt werden kann. Eine optimale Abschätzung für einen Verzerrungsparameter kann als die erste Abschätzung des Verzerrungsparameters behandelt werden. Wie vorstehend angegeben, kann das Kalibriermuster in einigen Fällen Musterelemente umfassen, die entlang gerader Gitterlinien angeordnet sind. Eine Linsenverzerrung kann bewirken, dass die Musterelemente in einem Kalibrierbild erscheinen, als ob sie entlang einer gekrümmten Bahn angeordnet wären. Eine modifizierte Version des Kalibrierbilds, das keine Verzerrung aufweist, kann keine Krümmung aufweisen, sodass Musterelemente in der modifizierten Version des Kalibrierbilds erscheinen, als wären sie entlang gerader Gitterlinien angeordnet.

[0091] Bei einer Ausführungsform kann eine Linienanpassungstechnik verwendet werden, um einen Krümmungsbetrag in der modifizierten Version des Kalibrierbilds zu bestimmen. Zum Beispiel können die mehreren Musterelemente in dem Kalibriermuster mehrere Punkte (z. B. kreisförmige Punkte) sein. Bei einem derartigen Beispiel kann die Steuerschaltung in Schritt **907** den Krümmungsbetrag bestimmen durch: Anpassen mehrerer gerader Linien durch die mehreren Punkte (z. B. durch entsprechende Mitten der Punkte) in der modifizierten Version des Kalibrierbilds und Bestimmen des Krümmungsbetrags basierend auf einem Abstand zwischen jeder geraden Linie der mehreren geraden Linien und einem entsprechenden Punkt (z. B. eine entsprechende Mitte des Punkts) der mehreren Punkte, durch welche die gerade Linie angepasst wird. Wenn die modifizierte Version des Kalibrierbilds nicht verzerrt wäre, hätte jede gerade Linie einen Abstand von Null mit den Punkten, durch welche die Linie angepasst ist, oder insbesondere einen Abstand von Null mit entsprechenden Mitten der Punkte. Die gerade Linie würde zum Beispiel durch entsprechende Mitten der Punkte hindurchgehen. **Fig. 10A** veranschaulicht jedoch ein Kalibrierbild, das einen Grad an Linsenverzerrung aufweist. Infolgedessen gehen eine oder mehrere der geraden Linien nicht durch entsprechende Mitten aller Punkte, an welche diese gerade Linie angepasst ist. **Fig. 10B** zeigt eine Linienanpassung für einen Teil der Punkte von **Fig. 10A**. In der Figur ist eine Linie, die an vier Punkten angepasst ist, außerhalb der entsprechenden Mitten von drei Punkten der vier Punkte. Der Krümmungsbetrag kann basierend auf einem entsprechenden Abstand zwischen einer Mitte jedes Punkts und der angepassten Linie in **Fig. 10B** berechnet werden, wie es durch einen entsprechenden Pfeil angegeben ist, der von der angepassten Linie ausgeht. Bei einer Ausführungsform kann der Krümmungsbetrag für die modifizierte Version des Kalibrierbilds durch eine Gesamtkrümmungspunktzahl dargestellt werden, die z. B. eine Summe von entsprechenden Krümmungspunktzahlen für in die Linienanpassung einbezogene einzelne Linien sein kann. Bei einer Ausführungsform kann Schritt **907** das Optimieren entsprechender Schätzwerte von mehreren Verzerrungsparametern einbeziehen, um eine Gesamtkrümmungspunktzahl für eine modifizierte Version des Kalibrierbilds zu minimieren, wobei die modifizierte Version basierend auf den Schätzwerten erzeugt wird.

[0092] Wie in **Fig. 9B** veranschaulicht, kann in Schritt **909** die Steuerschaltung **111** eine zweite Abschätzung des ersten intrinsischen Kameraparameters und eine zweite Abschätzung des zweiten intrinsischen Kameraparameters basierend auf der ersten Abschätzung des zweiten intrinsischen Kameraparameters bestimmen. Bei einer Ausführungsform basiert die Bestimmung bei Schritt **909** auch auf den mehreren Bildmusterelementorten und den definierten Musterelementorten. In Schritt **909** kann die erste Abschätzung des zweiten intrinsi-

schen Kameraparameters verwendet werden, um die erste Abschätzung des ersten intrinsischen Kameraparameters zu verfeinern, wobei die verfeinerte Abschätzung eine zweite Abschätzung des ersten intrinsischen Kameraparameters ist. Da der zweite intrinsische Kameraparameter in einer separaten Stufe in Schritt **907** abgeschätzt wird, kann wie vorstehend erörtert diese Abschätzung des zweiten intrinsischen Kameraparameters relativ zu einer Situation korrekter sein, bei der die erste Abschätzung des ersten intrinsischen Kameraparameters und die erste Abschätzung des zweiten intrinsischen Kameraparameters gleichzeitig in der gleichen Stufe bestimmt werden. Bei einer Ausführungsform kann diese korrektere Abschätzung des zweiten intrinsischen Kameraparameters dann verwendet werden, um eine bessere, aktualisierte Abschätzung des ersten intrinsischen Kameraparameters zu erzeugen, wobei die aktualisierte Abschätzung die zweite Abschätzung des ersten intrinsischen Kameraparameters ist.

[0093] Bei einer Ausführungsform kann in Schritt **909** der Algorithmus von Zhang verwendet werden. Der Algorithmus von Zhang kann als eine Eingabe insbesondere einen vermuteten Anfangswert für den zweiten intrinsischen Kameraparameter akzeptieren. Der vermutete Anfangswert kann eine optionale Eingabe für den Algorithmus von Zhang sein. In einigen Fällen kann diese optionale Eingabe in Schritt **905** nicht verwendet worden sein. Die optionale Eingabe kann jedoch in Schritt **909** verwendet werden, bei dem die erste Abschätzung des zweiten intrinsischen Kameraparameters als der vermutete Anfangswert für den Algorithmus von Zhang angewandt wird, die ferner die mehreren Bildmustererelementorte und die definierten Mustererelementorte verwenden kann, um die zweite Abschätzung des ersten intrinsischen Kameraparameters zu erzeugen. Bei einer Implementierung kann der Algorithmus von Zhang ferner eine zweite Abschätzung des zweiten intrinsischen Kameraparameters erzeugen und kann ferner eine Abschätzung einer Transformationsfunktion (z. B. $T_{CAMERA}^{PATTERN}$) ausgeben, die eine Beziehung zwischen einem Kamerakoordinatensystem und einer Musterkoordinate beschreibt.

[0094] Die Schritte **901** bis **909** können Teil einer intrinsischen Kalibrierphase eines Kamerakalibrierungsprozesses sein. Bei einer Ausführungsform kann die intrinsische Kalibrierphase ferner eine Stufe umfassen, bei der die Steuerschaltung die zweite Abschätzung des ersten intrinsischen Kameraparameters und die zweite Abschätzung des zweiten intrinsischen Kameraparameters verwendet, um einen simulierten Ort eines Musterelements zu bestimmen, und diese Abschätzungen anpasst, um eine dritte Abschätzung zu erzeugen, die eine Differenz zwischen dem simulierten Ort und einem aktuellen Ort des Musterelements minimiert.

[0095] Die Steuerschaltung kann insbesondere eine dritte Abschätzung des zweiten intrinsischen Kameraparameters und eine dritte Abschätzung des ersten intrinsischen Kameraparameters bestimmen durch: (a) Bestimmen eines simulierten Kalibrierbilds, das ein simuliertes Bild des Kalibrierusters ist, basierend auf der Abschätzung der ersten Transformationsfunktion, der zweiten Abschätzung des zweiten intrinsischen Kameraparameters und der zweiten Abschätzung des ersten intrinsischen Kameraparameters, (b) Bestimmen einer Differenz zwischen dem simulierten Kalibrierbild und dem durch die Kamera erfassten Kalibrierbild, (c) Anpassen der zweiten Abschätzung des zweiten intrinsischen Kameraparameters und der zweiten Abschätzung des ersten intrinsischen Kameraparameters basierend auf der Differenz, um eine angepasste Abschätzung des zweiten intrinsischen Kameraparameters und eine angepasste Abschätzung des ersten intrinsischen Kameraparameters zu erzeugen, welche die Differenz reduziert, wobei die angepasste Abschätzung des zweiten intrinsischen Kameraparameters die dritte Abschätzung davon ist und die angepasste Abschätzung des ersten intrinsischen Kameraparameters die dritte Abschätzung davon ist.

[0096] Bei einer Ausführungsform kann das simulierte Kalibrierbild die simulierten Pixelkoordinaten $[u_{simulated} \ v_{simulated}]^T$ von verschiedenen Musterelementen umfassen. Eine simulierte Pixelkoordinate für ein Musterelement kann eine vorhergesagte Pixelkoordinate sein, die basierend auf entsprechenden Abschätzungen intrinsischer Kameraparameter und z. B. $T_{CAMERA}^{PATTERN}$ vorhersagt, wo das Muster erscheinen wird. Die simulierten Pixelkoordinaten können zum Beispiel basieren auf der Beziehung

$$\begin{bmatrix} X_{simulated} \\ Y_{simulated} \\ Z_{simulated} \\ 1 \end{bmatrix}_{Camera} = T_{CAMERA}^{PATTERN} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \\ 1 \end{bmatrix}_{Pattern}$$

$$\hat{X} = d_x \left(\frac{X}{Z}, \frac{Y}{Z} \right), \hat{Y} = d_y \left(\frac{X}{Z}, \frac{Y}{Z} \right)$$

$$\begin{bmatrix} u_{simulated} \\ v_{simulated} \\ 1 \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} \hat{X} \\ \hat{Y} \\ 1 \end{bmatrix}$$

[0097] Bei dem vorstehenden Beispiel kann K die zweite Abschätzung des ersten intrinsischen Kameraparameters sein und kann angepasst werden, um die dritte Abschätzung davon zu finden. Die Verzerrungsfunktionen d_x und d_y können auf der zweiten Abschätzung des bzw. der zweiten intrinsischen Kameraparameter basieren, die angepasst werden können, um die dritte Abschätzung davon zu finden. Ferner kann $T_{CAMERA}^{PATTERN}$ eine Abschätzung sein, die bei Schritt **909** erlangt wird, während $[X' Y' Z']_{Pattern}$ eine bekannte Koordinate eines Musterelements in dem Musterkoordinatensystem ist.

[0098] Bei dem vorstehenden Beispiel kann die Steuerschaltung **111** einen Abstand zwischen einer entsprechenden simulierten Pixelkoordinate und einer tatsächlichen Pixelkoordinate berechnen, wobei die simulierte Pixelkoordinate darstellt, wo ein Musterelement bei $[X' Y' Z']_{Pattern}$ in dem simulierten Kalibrierbild erscheint, und die tatsächliche Pixelkoordinate darstellt, wo das Musterelement in dem durch die Kamera erfassten Kalibrierbild tatsächlich erscheint. Die Steuerschaltung **111** kann durch Anpassen der zweiten Abschätzung des ersten intrinsischen Kameraparameters (Projektionsmatrix K), der Abschätzung des bzw. der zweiten intrinsischen

Kameraparameter (z. B. eines bzw. von Verzerrungsparametern) und der Abschätzung von $T_{CAMERA}^{PATTERN}$ eine Optimierung ausführen, bis die Abstände minimiert (z. B. näher an Null) sind. Die angepassten Schätzungen für diese Parameter können zur dritten Abschätzung davon werden. Bei einer Ausführungsform kann die dritte Abschätzung des ersten intrinsischen Kameraparameters eine abschließende Abschätzung des ersten intrinsischen Kameraparameters sein und die dritte Abschätzung des zweiten intrinsischen Kameraparameters eine abschließende Abschätzung des zweiten intrinsischen Kameraparameters sein, sodass eine Ausgabe der intrinsischen Kalibrierphase die dritten Abschätzungen des ersten intrinsischen Kameraparameters und des zweiten intrinsischen Kameraparameters sein kann.

[0099] Wie vorstehend angegeben, kann die Kamerakalibrierung zusätzlich zu der intrinsischen Kalibrierphase eine Stereokalibrierungsphase umfassen. Zum Beispiel in einem System, das wie System **100A** mehr als eine Kamera einbezieht, in dem das Robotersteuersystem **110** konfiguriert ist, mit einer ersten Kamera und einer zweiten Kamera zu kommunizieren. Die erste Kamera kann ein erstes Kamerakoordinatensystem aufweisen, das in Bezug auf einen Ort und eine Ausrichtung der ersten Kamera definiert ist, und die zweite Kamera kann ein zweites Kamerakoordinatensystem aufweisen, das in Bezug auf einen Ort und eine Ausrichtung der zweiten Kamera definiert ist. In diesem Fall kann die Steuerschaltung **111** des Robotersteuersystems **110** konfiguriert sein, die Stereokalibrierungsphase durch Bestimmen einer Funktion (z. B. einer Matrix) auszuführen, die eine Beziehung zwischen dem ersten Kamerakoordinatensystem und dem zweiten Kamerakoordinatensystem beschreibt.

[0100] Wenn das Robotersteuersystem **110** in Kommunikation mit mehreren Kameras ist, kann das Robotersteuersystem **110** beispielsweise konfiguriert sein, Werte von intrinsischen Kameraparametern für jede der mehreren Kameras abzuschätzen und Orte der mehreren Kameras relativ zueinander und/oder deren Ausrichtungen relativ zueinander abzuschätzen. Bei einer Ausführungsform können die relativen Orte und Ausrichtungen zwischen zwei Kameras (z. B. 170 und 180 von **Fig. 1A**) als ein Translationsvektor und eine Rotationsmatrix zwischen den zwei Kameras ausgedrückt werden.

[0101] Wie vorstehend angegeben, kann die Kamerakalibrierung eine Hand-Auge-Kalibrierphase einbeziehen. Bei Schritt **911** kann die Steuerschaltung **111** zum Beispiel basierend auf der zweiten Abschätzung des ersten intrinsischen Kameraparameters und der zweiten Abschätzung des zweiten intrinsischen Kameraparameters eine Abschätzung einer Transformationsfunktion (z. B. T_{World}^{Camera}) bestimmen, die eine Beziehung zwischen einem Kamerakoordinatensystem und einem Weltkoordinatensystem beschreibt. Wie vorstehend angegeben, kann das Kamerakoordinatensystem ein Koordinatensystem sein, das in Bezug auf einen Ort und eine Ausrichtung der Kamera definiert ist, und das Weltkoordinatensystem ist ein Koordinatensystem, das in Bezug auf einen Ort definiert ist, der relativ zu der Basis des Roboters stationär ist. Schritt **911** kann direkt

auf den zweiten Abschätzungen des intrinsischen Kameraparameters oder indirekt darauf basieren. Schritt **911** kann zum Beispiel direkt auf der dritten Abschätzung des ersten intrinsischen Kameraparameters und der dritten Abschätzung des zweiten intrinsischen Kameraparameters basieren, die wiederum auf der zweiten Abschätzung des ersten intrinsischen Kameraparameters und der zweiten Abschätzung des zweiten intrinsischen Kameraparameters basieren. Bei einem derartigen Beispiel basiert Schritt **911** indirekt auf den zweiten Abschätzungen der intrinsischen Kameraparameter.

[0102] Bei einer Ausführungsform kann $T_{CAMERA}^{PATTERN}$ ein Beispiel einer ersten Transformationsfunktion sein und T_{WORLD}^{CAMERA} ein Beispiel einer zweiten Transformationsfunktion sein. In einigen Fällen kann die zweite Transformationsfunktion basierend auf der ersten Transformationsfunktion bestimmt werden.

[0103] Bei einem spezifischeren Beispiel kann eine Aufgabe der Hand-Auge-Kalibrierung sein, T_{WORLD}^{CAMERA} und $T_{LINK}^{PATTERN}$ (die ein Beispiel einer vierten Transformationsfunktion sein können) basierend auf $T_{CAMERA}^{PATTERN}$ und T_{WORLD}^{LINK} (die ein Beispiel einer dritten Transformationsfunktion sein können) zu bestimmen.

[0104] Bei einer Ausführungsform kann die Hand-Auge-Kalibrierung basieren auf der Beziehung:

$$T_{WORLD}^{LINK} T_{LINK}^{PATTERN} = T_{WORLD}^{CAMERA} T_{CAMERA}^{PATTERN}$$

[0105] Bei dem vorstehenden Beispiel kann T_{WORLD}^{LINK} und $T_{CAMERA}^{PATTERN}$ bekannt sein oder zu einem Beginn der Hand-Auge-Kalibrierphase bestimmt werden. Zum Beispiel kann T_{WORLD}^{LINK} basierend auf Bewegungsbefehlen, die das Robotersteuersystem **110** zu einem Roboter (z. B. 150 von **Fig. 1A**) kommuniziert hat, bestimmt werden. Bei einem Beispiel können die Bewegungsbefehle Motorbefehle sein, die eine Drehbewegung von Gelenken bewirken, die einen Roboterarm des Roboters bilden, und T_{WORLD}^{LINK} kann von der durch die Motorbefehle bewirkten Drehbewegung bestimmt werden. Bei einem Beispiel kann $T_{CAMERA}^{PATTERN}$ basierend auf der Projektionsmatrix K bestimmt werden, die von der intrinsischen Kalibrierphase abgeschätzt wurde. Zum Beispiel basiert $T_{CAMERA}^{PATTERN}$ auf der Beziehung:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}_{Camera} = T_{CAMERA}^{PATTERN} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \\ 1 \end{bmatrix}_{Pattern}$$

[0106] Bei dem vorstehenden Beispiel kann $[XYZ]_{Camera}^T$ eine Koordinate im Sichtfeld der Kamera eines Musterelements sein und von einem Kalibrierbild, in dem das Musterelement erscheint, und von einer Abschätzung der Projektionsmatrix und Abschätzungen der Verzerrungsparameter abgeschätzt werden. In einigen Fällen kann $T_{CAMERA}^{PATTERN}$ unter Verwendung des Perspective-n-Point-Algorithmus abgeschätzt werden, der eine Abschätzung einer Projektionsmatrix und eine Abschätzung eines bzw. von Verzerrungsparametern einer Kamera verwenden kann, um $T_{CAMERA}^{PATTERN}$ zu bestimmen. Solche Abschätzungen der Projektionsmatrix und des bzw. der Verzerrungsparameter können von der intrinsischen Kalibrierphase stammen oder von einem Hersteller der Kamera definierte Werte sein. Bei einem weiteren Beispiel kann $T_{CAMERA}^{PATTERN}$ selbst ein Nebenprodukt der intrinsischen Kalibrierphase sein. Wenn die intrinsische Kalibrierphase den Algorithmus von Zhang verwendet, kann der Algorithmus zum Beispiel eine Abschätzung von $T_{CAMERA}^{PATTERN}$ ausgeben und diese Abschätzung kann für die Hand-Auge-Kalibrierphase gespeichert werden.

[0107] Bei einer Ausführungsform ist die Gleichung $T_{WORLD}^{LINK} T_{LINK}^{PATTERN} = T_{WORLD}^{CAMERA} T_{CAMERA}^{PATTERN}$ für die unbekannten Matrizen T_{WORLD}^{CAMERA} und $T_{LINK}^{PATTERN}$ nicht linear und nicht konvex. Die nicht konvexe Form kann eine Effektivität des Iterierens durch unterschiedliche Schätzungen für einen Wert der Matrizen begrenzen, da die Iteration zu einer Lösung führen kann, die anstatt global optimal nur lokal optimal ist. Eine Implementierung der Hand-Auge-Kalibrierphase kann daher eine Neuformulierung der vorstehenden Gleichung in eine konvexe Form einbeziehen. Bei einer Ausführungsform kann die Neuformulierung ein Umschreiben der vorstehenden Gleichung als ein Kronecker-Produkt von vektorisierten Matrizen einbeziehen.

[0108] Die vorstehende Gleichung kann insbesondere umgeschrieben werden zu:

$$\begin{bmatrix} R_{WORLD}^{LINK} & t_{WORLD}^{LINK} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{LINK}^{PATTERN} & t_{LINK}^{PATTERN} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{WORLD}^{CAMERA} & t_{WORLD}^{CAMERA} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{CAMERA}^{PATTERN} & t_{CAMERA}^{PATTERN} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

[0109] Diese Gleichung kann wiederum als zwei Gleichungen umgeschrieben werden:

$$R_A R_X - R_Z R_B = 0$$

$$R_Z t_B - R_A t_X + t_Z = t_A$$

[0110] In den vorstehenden Gleichungen wird die Nomenklatur für die verschiedenen Drehmatrizen und den Translationsvektor wie folgt geschrieben:

$$R_A = R_{WORLD}^{LINK}, R_X = R_{LINK}^{PATTERN}, R_Z = R_{WORLD}^{CAMERA}, R_B = R_{CAMERA}^{PATTERN}$$

$$t_A = t_{WORLD}^{LINK}, t_X = t_{LINK}^{PATTERN}, t_Z = t_{WORLD}^{CAMERA}, t_B = t_{CAMERA}^{PATTERN}$$

[0111] Die vorstehenden Gleichungen können als die folgende Gleichung unter Verwendung vektorisierter Versionen der vorstehenden Matrizen und Kronecker-Produkte umgeschrieben werden:

$$\begin{bmatrix} R_A \otimes I_3 & R_B^T \otimes I_3 & 0 & 0 \\ 0 & I_3 R_B^T \otimes t_B^T & -R_A & I_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{vec}(R_X) \\ \text{vec}(R_Z^T) \\ t_X \\ t_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ t_A \end{bmatrix}$$

[0112] Bei dem vorstehenden Beispiel ist I_3 eine 3×3-Einheitsmatrix. Die vorstehende Gleichung ist linear und konvex, was das Auflösen für die Optimalwerte R_X , t_X , R_Z , t_Z , d. h. $R_{LINK}^{PATTERN}$, $t_{LINK}^{PATTERN}$, R_{WORLD}^{CAMERA} , t_{WORLD}^{CAMERA} , erleichtern kann. In den vorstehenden Gleichungen können insbesondere die Ausdrücke

$\begin{bmatrix} R_A \otimes I_3 & R_B^T \otimes I_3 & 0 & 0 \\ 0 & I_3 R_B^T \otimes t_B^T & -R_A & I_3 \end{bmatrix}$ und $\begin{bmatrix} 0 \\ t_A \end{bmatrix}$ bekannt sein, da sie Komponenten umfas-

sen, die zu T_{WORLD}^{LINK} und $T_{CAMERA}^{PATTERN}$ gehören. Die vorstehenden Gleichungen können daher $\begin{bmatrix} \text{vec}(R_X) \\ \text{vec}(R_Z^T) \\ t_X \\ t_Z \end{bmatrix}$ lösen, was ein unbekannter Begriff ist. Wie vorstehend angegeben, kann die lineare und konvexe Art der Gleichung es einfacher machen, diesen unbekannten Ausdruck zu lösen, wobei eine Lösung des unbekannten

Ausdrucks verwendet werden kann, um R_X , t_X , R_Z , t_Z zu rekonstruieren, die Komponenten von T_{WORLD}^{LINK} und $T_{CAMERA}^{PATTERN}$ sind.

[0113] Bei einer Ausführungsform kann die Lösung der vorstehenden Gleichung zu R_X und R_Z führen, die nicht perfekte Drehmatrizen sind, da sie jeweils Spaltenvektoren umfassen können, die nicht zueinander orthogonal sind. Bei dieser Ausführungsform kann die Steuerschaltung **111** von R_X eine Matrix R_X^* ableiten, die Spaltenvektoren aufweist, die zueinander orthogonal sind. Ähnlich kann die Steuerschaltung **111** von R_Z eine Drehmatrix R_Z^* ableiten, die Spaltenvektoren aufweist, die zueinander orthogonal sind. Bei einer Ausführungsform kann die Steuerschaltung **111** diese Operation basierend auf dem Lösen eines Orthogonal-Prokrustes-Problems ausführen, was das Finden der nächsten orthogonalen Matrix R_X^* zu einer nicht orthogonalen Matrix R_X (in Form einer Frobenius-Norm) und das Finden der nächsten orthogonalen Matrix R_Z^* zu einer nicht orthogonalen Matrix R_Z einbezieht. In einigen Fällen kann dies über eine Singulärwertzerlegung erfolgen, die das Finden der Matrizen C_X und D_X einbeziehen kann, sodass $C_X \Sigma D_X^T$ gleich R_X ist, und das Finden der Matrizen C_Z und D_Z , sodass $C_Z \Sigma D_Z^T$ gleich R_Z ist, wobei Σ eine Diagonalmatrix ist. Bei dieser Ausführungsform kann R_X^* als $C_X \Sigma D_X^T$ und R_Z^* als $C_Z \Sigma D_Z^T$ bestimmt werden.

[0114] Bei einer Ausführungsform kann die Steuerschaltung **111** die orthogonalen Matrizen R_X^* und R_Z^* verwenden, um die Translationsvektoren t_X und t_Z weiter zu aktualisieren. Die aktualisierten Translationsvektoren können als t_X^* und t_Z^* bezeichnet werden. Bei einigen Implementierungen kann die Aktualisierung unter Verwendung der vorstehenden Gleichung $R_Z t_B - R_A t_X + t_Z = t_A$ erfolgen, die aber R_Z^* für R_Z , t_X^* für t_X und t_Z^* für t_Z substituiert. Die resultierende Gleichung kann als

$$R_Z^* t_B - R_A t_X^* + t_Z^* = t_A \text{ ausgedrückt werden, die als } \begin{bmatrix} -R_A & I_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_X^* \\ t_Z^* \end{bmatrix} = t_A - R_Z^* t_B \text{ umgeschrieben werden kann.}$$

Die vorstehende Gleichung kann für t_X^* und t_Z^* gelöst werden. Die resultierenden Drehmatrizen und Translationsvektoren können eine Abschätzung von $T_{LINK}^{PATTERN}$ und T_{WORLD}^{CAMERA} bilden, die ausgedrückt werden kann als:

$$T_{PATTERN}^{LINK} = T_X = \begin{bmatrix} R_X^* & t_X^* \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{WORLD}^{CAMERA} = T_Z = \begin{bmatrix} R_Z^* & t_Z^* \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

[0115] Bei einer Ausführungsform kann die Hand-Auge-Kalibrierphase die Verwendung der vorstehenden Parameter, um ein simuliertes Kalibrierbild zu bestimmen, das ein simuliertes Bild eines Kalibriermusters ist, und das Einstellen von Werten der vorstehenden Parameter einbeziehen, um eine Differenz zwischen der simulierten Kalibrierung und einem tatsächlichen Kalibrierbild zu minimieren, das ein tatsächliches Bild des Kalibriermusters ist. Die Steuerschaltung **111** kann insbesondere basierend auf der Abschätzung der vierten Transformationsfunktion (z.B. $T_{LINK}^{PATTERN}$), auf der Abschätzung der dritten Transformationsfunktion (z.B. T_{WORLD}^{LINK}) auf

der Abschätzung der zweiten Transformationsfunktion (z.B. T_{WORLD}^{CAMERA}) und basierend auf (direkt oder indirekt) der zweiten Abschätzung des ersten intrinsischen Kameraparameters (z. B. Projektionsmatrix K) ein simuliertes Kalibrierbild des Kalibriermusters bestimmen. Das simulierte Kalibrierbild kann durch z. B. Pixelkoordinaten $[\tilde{u}_{sim} \ \tilde{v}_{sim}]^T$, von wo Musterelemente im simulierten Kalibrierbild erscheinen, dargestellt werden. Die Pixel-

koordinaten können simulierte Koordinaten sein, wobei eine simulierte Koordinate für ein Musterelement eine vorhergesagte Koordinate sein kann, die vorhersagt, wo das Musterelement in einem Kalibrierbild erscheinen wird, das auf entsprechenden Abschätzungen der vorstehenden Transformationsfunktionen basiert. Die simulierten Pixelkoordinaten können zum Beispiel berechnet werden basierend auf der Beziehung:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}_{\text{Camera}} = T_{\text{CAMERA}}^{\text{PATTERN}} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \\ 1 \end{bmatrix}_{\text{Pattern}} = \left(T_{\text{WORLD}}^{\text{CAMERA}} \right)^{-1} T_{\text{WORLD}}^{\text{LINK}} T_{\text{LINK}}^{\text{PATTERN}} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \\ 1 \end{bmatrix}_{\text{Pattern}}$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{u}_{\text{sim}} \\ \tilde{v}_{\text{sim}} \\ 1 \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} X/Z \\ Y/Z \\ 1 \end{bmatrix}_{\text{CAMERA}}$$

[0116] Bei einer Ausführungsform muss das simulierte Kalibrierbild einen Linsenverzerrungseffekt nicht berücksichtigen. Bei einer weiteren Ausführungsform berücksichtigt das simulierte Kalibrierbild einen Linsenverzerrungseffekt, wie beispielsweise durch Anwenden der Verzerrungsfunktion auf X/Z und Y/Z .

[0117] Bei einer Ausführungsform kann das simulierte Kalibrierbild mit einer modifizierten Version des durch die Kamera erfassten tatsächlichen Kalibrierbildes verglichen werden. Die modifizierte Version kann gegenüber der durch die Linse der Kamera bewirkten Verzerrung kompensieren. Das tatsächliche Kalibrierbild kann insbesondere durch die Pixelkoordinaten $[u, v]^T$ der Musterelemente dargestellt werden und eine Linsenverzerrung aufweisen. Die modifizierte Version des Kalibrierbilds kann durch die Pixelkoordinaten $[\tilde{u}, \tilde{v}]^T$ der Musterelemente dargestellt werden und kann einen Linsenverzerrungseffekt kompensieren. Wie vorstehend angegeben, kann die modifizierte Version des Kalibrierbildes bestimmt werden basierend auf der Beziehung:

$$\begin{bmatrix} \hat{X} \\ \hat{Y} \\ 1 \end{bmatrix} = K^{-1} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{X} = d_x^{-1}(\hat{X}, \hat{Y})$$

$$\tilde{Y} = d_y^{-1}(\hat{X}, \hat{Y})$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \\ 1 \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} \tilde{X} \\ \tilde{Y} \\ 1 \end{bmatrix}$$

[0118] Bei einer Ausführungsform kann die Steuerschaltung **111** eine Differenz zwischen simulierten Pixelkoordinaten von Musterelementen in dem simulierten Kalibrierbild und Pixelkoordinaten von entsprechenden Musterelementen in der modifizierten Version des durch die Kamera erfassten Kalibrierbilds (z. B. zwischen $[\tilde{u}_{\text{sim}}, \tilde{v}_{\text{sim}}]^T$ und $[\tilde{u}, \tilde{v}]^T$) bestimmen. Bei einer Ausführungsform kann die Differenz als ein Abstand ausgedrückt werden, der bestimmt wird als

$$\text{distance} = \sqrt{(\tilde{u}_{\text{sim}} - \tilde{u})^2 + (\tilde{v}_{\text{sim}} - \tilde{v})^2}$$

[0119] Bei einer Ausführungsform kann die Steuerschaltung **111** mindestens die Abschätzung der vierten Transformationsfunktion (z.B. $T_{\text{LINK}}^{\text{PATTERN}}$) und die Abschätzung der zweiten Transformationsfunktion (z.B.

T_{WORLD}^{CAMERA}) anpassen, um die Differenz zwischen dem simulierten Kalibrierbild und der modifizierten Version des Kalibrierbilds zu reduzieren. Die Steuerschaltung **111** kann zum Beispiel entsprechende Werte der Komponenten $T_{LINK}^{PATTERN}$ und T_{WORLD}^{CAMERA} anpassen, $[\tilde{u}_{sim} \tilde{v}_{sim}]^T$ basierend auf den angepassten Matrizen neu berechnen und den Abstand basierend auf dem neu berechneten $[\tilde{u}_{sim} \tilde{v}_{sim}]^T$ bestimmen. Die Steuerschaltung **111** kann die Anpassung auf eine Weise wiederholen, die den vorstehenden Abstand minimiert. Bei einer Ausführungsform kann die Steuerschaltung **111** die vorstehenden Matrizen anpassen, um einen Fehler in dem simulierten Kalibrierbild zu minimieren, wobei der Fehler eine Summe der entsprechenden Abstände zwischen (a) entsprechenden Pixelkoordinaten von allen Musterelementen in der modifizierten Version des Kalibrierbilds und (b) entsprechenden Pixeln der gleichen entsprechenden Musterelemente in dem simulierten Kalibrierbild sein kann. Bei einer Ausführungsform kann die Anpassung auf einem Optimierungsalgorithmus zum Lösen von uneingeschränkten nichtlinearen Optimierungsproblemen, wie beispielsweise dem Nelder-Mead-Algorithmus, dem Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno- (BFGS) - Algorithmus und dem Gradientenabstiegsalgorithmus, basieren. Bei einer Ausführungsform kann die vorstehende Optimierung auch Anpassungen an entsprechende Werte von $T_{CAMERA}^{PATTERN}$, K und/oder einen oder mehrere Verzerrungsparameter einbeziehen. Bei einer Ausführungsform kann ein Resultat der Optimierung eine abschließende Abschätzung für die Hand-Auge-Kalibrierphase (z. B. eine abschließende Abschätzung von $T_{LINK}^{PATTERN}$ und/oder T_{WORLD}^{CAMERA}) sein.

[0120] Unter erneuter Bezugnahme auf **Fig. 9B** kann das Verfahren **900** einen Schritt **913** einbeziehen, der nach Schritt **911** ausgeführt wird. Bei Schritt **913** kann die Steuerschaltung **111** ein anschließendes Bild von der Kamera und, um eine Platzierung des Roboterarms durch Ausgeben an den Roboter zu steuern (z. B. über die Kommunikationsschnittstelle **113**), einen anschließenden Bewegungsbefehl, der auf dem anschließenden Bild und auf der Abschätzung der Transformationsfunktion basiert, empfangen. Das anschließende Bild kann zum Beispiel ein Bild eines Pakets auf einem Förderband oder eines anderen Objekts im Kamerasichtfeld sein. Die Kamera kann das anschließende Bild automatisch oder als Reaktion auf einen Kamerabefehl erfassen, der durch die Steuerschaltung **111** erzeugt und über die Kommunikationsschnittstelle zu der Kamera kommuniziert wird. Bei einer Ausführungsform kann die Steuerschaltung **111** den anschließenden Bewegungsbefehl basierend auf der Abschätzung der Transformationsfunktion (z.B. T_{WORLD}^{CAMERA}) erzeugen. Zum Beispiel kann T_{WORLD}^{CAMERA} verwendet werden, um eine Beziehung zwischen einem fotografierten Objekt (z. B. dem Paket) und einem Roboter, der mit dem Objekt interagieren wird, zu bestimmen basierend auf der Beziehung:

$$T_{WORLD}^{OBJECT} = T_{WORLD}^{CAMERA} T_{CAMERA}^{OBJECT}$$

[0121] Bei der vorstehenden Gleichung wird T_{WORLD}^{CAMERA} durch die Kamerakalibrierung bestimmt und T_{CAMERA}^{OBJECT} kann bei einigen Fällen von einem Maschinellen-Sehen-Algorithmus bestimmt werden. Da die hierin erörterte Kamerakalibrierung korrektere Kalibrierinformationen, wie beispielsweise eine korrektere Abschätzung von T_{WORLD}^{CAMERA} erzeugt, können die Kalibrierinformationen eine korrektere Abschätzung von T_{WORLD}^{OBJECT} ergeben, was ermöglichen kann, dass der Roboter auf eine Weise gesteuert wird, die eine robustere Interaktion mit dem Objekt bereitstellt.

[0122] **Fig. 11A** stellt ein weiteres Diagramm bereit, das eine Ausführungsform einer intrinsischen Kalibrierphase einer Kamerakalibrierung veranschaulicht. In einigen Fällen kann der Vorgang in **Fig. 11A** durch z. B. die Steuerschaltung **111** von **Fig. 1A** des Robotersteuersystems **110** von **Fig. 1A** ausgeführt werden. Bei einer Ausführungsform bezieht die intrinsische Kalibrierphase eine Stufe 0 ein, bei der mehrere Kalibrierbilder empfangen werden, wobei die Kalibrierbilder Bilder eines Kalibriermusters sind. Das Kalibriermuster kann an einem Roboterarm eines Roboters feststehend angebracht sein und kann Musterelemente aufweisen, die Musterpunkte sind. Jeder der Musterpunkte kann einen definierten Musterelementort aufweisen, der bei diesem Beispiel eine 3D-Musterkoordinate $[X'Y'Z']_{Pattern}^T$ sein kann. Für jedes Kalibrierbild der mehreren Kalibrierbilder kann jeder der Musterpunkte auch einen Bildmusterelementort aufweisen (der auch als ein erfasster Musterelementort bezeichnet wird), der bei diesem Beispiel eine 2D-Pixelkoordinate sein kann. Bei einer Ausführungsform bezieht die Stufe 0 der intrinsischen Kalibrierphase das Bestimmen der entsprechenden 3D-

Musterkoordinaten der Musterpunkte in dem Musterkoordinatensystem und das Bestimmen der 2D-Pixelkoordinaten ein, an denen die Musterpunkte in den mehreren Kalibrierbildern erscheinen.

[0123] Bei einer Ausführungsform bezieht die Stufe 1 der intrinsischen Kalibrierphase das Eingeben der 3D-Musterkoordinaten und der 2D-Pixelkoordinaten der Musterpunkte in einen Algorithmus zum Abschätzen einer

Projektionsmatrix K , einer Transformationsfunktion $T_{CAMERA}^{PATTERN}$ und entsprechender Werte für Verzerrungsparameter einer Verzerrungsfunktion ein. Stufe 1 kann zum Beispiel den Algorithmus von Zhang verwenden, um eine erste Abschätzung der Projektionsmatrix K zu erzeugen. Bei diesem Beispiel kann der Algorithmus von

Zhang oder ein anderer Algorithmus auch eine Abschätzung von $T_{CAMERA}^{PATTERN}$ und die entsprechenden Werte der Verzerrungsparameter in der gleichen Stufe bestimmen, aber diese Abschätzungen können für die nächste Stufe verworfen oder anderweitig ignoriert werden. Bei einer Ausführungsform kann der Algorithmus von Zhang als eine optionale Eingabe einen oder mehrere vermutete Werte für einen oder mehrere entsprechende Verzerrungsparameter aufweisen. Bei dem Beispiel von **Fig. 11A** ist diese optionale Eingabe in Stufe 1 jedoch nicht verwendet.

[0124] Bei einer Ausführungsform bezieht die Stufe 2 der intrinsischen Kalibrierphase das Eingeben der ersten Abschätzung der Projektionsmatrix K in einen Linienbegradigungsalgorithmus ein, wobei der Linienbegradigungsalgorithmus eine erste Abschätzung eines Verzerrungsparameters oder einen ersten Satz von entsprechenden Abschätzungen eines Satzes von Verzerrungsparametern erzeugen kann. Bei einer Ausführungsform kann der Linienbegradigungsalgorithmus Operationen einbeziehen, die vorstehend in Bezug auf Schritt **907** des Verfahrens **900** und in Bezug auf die **Fig. 10A** und **Fig. 10B** erörtert sind.

[0125] Bei einer Ausführungsform bezieht die Stufe 3 der intrinsischen Kalibrierphase die Verwendung der ersten Abschätzung des Verzerrungsparameters (oder des ersten Satzes von entsprechenden Abschätzungen von mehreren Verzerrungsparametern) ein, um eine zweite Abschätzung der Projektionsmatrix K , eine zweite Abschätzung des Verzerrungsparameters (oder eines zweiten Satzes von entsprechenden Abschätzungen der

mehreren Verzerrungsparameter) und eine Abschätzung von $T_{CAMERA}^{PATTERN}$ zu erzeugen. In einigen Fällen wird der Algorithmus von Zhang in Stufe 3 erneut verwendet. Diese Stufe kann jedoch die erste Abschätzung des Verzerrungsparameters (oder des ersten Satzes von entsprechenden Abschätzungen von mehreren Verzerrungsparametern) als die vorstehend beschriebene optionale Eingabe verwenden, wobei die optionale Eingabe eine Schätzung sein kann, die in einer korrekteren Ausgabe des Algorithmus von Zhang resultiert.

[0126] Bei einer Ausführungsform bezieht die Stufe 4 der intrinsischen Kalibrierphase das Bestimmen einer dritten Abschätzung der Projektionsmatrix und einer dritten Abschätzung des Verzerrungsparameters (oder eines dritten Satzes von entsprechenden Abschätzungen für die mehreren Verzerrungsparameter) ein. Wie in **Fig. 11A** dargestellt, kann die Stufe 4 mit einem Optimierer ausgeführt werden. Wie vorstehend beschrieben, kann die durch den Optimierer ausgeführte Optimierung das Bestimmen eines simulierten Kalibrierbilds eines

Kalibriermusters basierend auf der Abschätzung von $T_{CAMERA}^{PATTERN}$, der zweiten Abschätzung von K und der zweiten Abschätzung des Verzerrungsparameters einbeziehen und das Anpassen der zweiten Abschätzung daran, um eine Differenz zwischen dem simulierten Kalibrierbild und einem tatsächlichen Kalibrierbild des Kalibriermusters zu minimieren.

[0127] Bei der vorstehenden Ausführungsform von **Fig. 11A** können die Abschätzung von $T_{CAMERA}^{PATTERN}$ und/oder der entsprechenden Werte der Verzerrungsparameter in der Stufe 1 für die nächsten Stufen verworfen oder anderweitig ignoriert werden. Bei einer weiteren Ausführungsform können eine oder mehrere der vorstehenden Abschätzungen für jede Stufe verwendet werden, die Stufe 1 folgt. Wie in **Fig. 11B** veranschaulicht, kann eine Abschätzung der Verzerrungsparameterwerte in der Stufe 1 zum Beispiel als eine anfängliche Schätzung der Verzerrungsparameterwerte in der Stufe 2 der intrinsischen Kalibrierphase verwendet werden. In **Fig. 11B**

kann ferner eine Abschätzung von $T_{CAMERA}^{PATTERN}$ verwendet werden, um eine Hand-Auge-Kalibrierung in der Stufe 2 der Hand-Auge-Kalibrierphase von **Fig. 12** auszuführen.

[0128] **Fig. 12** stellt ein Diagramm bereit, das eine beispielhafte Ausführungsform einer Hand-Auge-Kalibrierphase der Kamerakalibrierung veranschaulicht, die auch durch das Robotersteuersystem **110** von **Fig. 1A** ausgeführt werden kann. In einigen Fällen wird die Hand-Auge-Kalibrierphase nach der intrinsischen Kalibrierphase von **Fig. 11A** ausgeführt.

[0129] Bei einer Ausführungsform bezieht die Stufe 1 der Hand-Auge-Kalibrierphase das Bestimmen einer Abschätzung von $T_{CAMERA}^{PATTERN}$ und T_{WORLD}^{LINK} ein. In einigen Fällen basiert T_{WORLD}^{LINK} auf einer Motormessung, die z. B. Sensorwerte umfassen kann, die entsprechende Rotationsbeträge für mehrere Motoren eines Roboterarms des Roboters anzeigen. In einigen Fällen basiert $T_{CAMERA}^{PATTERN}$ auf einem Bildverarbeitungsalgorithmus und kann auf einer abschließenden Abschätzung der Projektionsmatrix K und einer abschließenden Abschätzung des Verzerrungsparameters (oder eines abschließenden Satzes von Abschätzungen der mehreren Verzerrungsparameter) basieren. Bei einem Beispiel kann $T_{CAMERA}^{PATTERN}$ von der Stufe 1 der intrinsischen Kalibrierphase von **Fig. 11B** stammen.

[0130] Bei einer Ausführungsform bezieht die Stufe 2 der Hand-Auge-Kalibrierphase das Bestimmen von T_{WORLD}^{CAMERA} und $T_{LINK}^{PATTERN}$ ein. Diese Bestimmung kann zum Beispiel das Lösen der Gleichung $T_{WORLD}^{LINK} T_{LINK}^{PATTERN} = T_{WORLD}^{CAMERA} T_{CAMERA}^{PATTERN}$ umfassen.

[0131] Bei einer Ausführungsform bezieht die Stufe 3 der Hand-Auge-Kalibrierphase das Anpassen einer Abschätzung von T_{WORLD}^{CAMERA} und $T_{LINK}^{PATTERN}$ ein. Diese Anpassung kann durch einen Optimierer ausgeführt werden, der basierend auf dem Minimieren einer Differenz zwischen einem simulierten Kalibrierbild eines Kalibriermusters und einem tatsächlichen Kalibrierbild des Kalibriermusters eine Optimierung ausführen kann. Das simulierte Kalibrierbild kann wie vorstehend beschrieben auf $(T_{WORLD}^{CAMERA})^{-1} T_{WORLD}^{LINK} T_{LINK}^{PATTERN} [X'Y'Z']^T_{PATTERN}$ basieren. Bei einer Ausführungsform kann die angepasste Abschätzung T_{WORLD}^{CAMERA} und $T_{LINK}^{PATTERN}$ eine abschließende Abschätzung der Hand-Auge-Kalibrierphase sein.

[0132] Die Ausführungsform A1 der vorliegenden Offenbarung betrifft ein Robotersteuersystem, das eine Kommunikationsschnittstelle und eine Steuerschaltung umfasst. Die Kommunikationsschnittstelle ist konfiguriert, mit einem Roboter und mit einer Kamera mit einem Kamerasichtfeld zu kommunizieren, wobei der Roboter eine Basis und einen Roboterarm mit einem darauf angeordneten Kalibriermuster aufweist. Die Steuerschaltung ist konfiguriert, eine Kamerakalibrierung auszuführen, durch: a) Bestimmen aller Eckorte eines imaginären Würfels, der in das Kamerasichtfeld passt, b) Bestimmen mehrerer Orte, die an oder überall in dem imaginären Würfel verteilt sind, c) Steuern des Roboterarms durch Ausgeben von Bewegungsbefehlen an den Roboter über die Kommunikationsschnittstelle, um das Kalibriermuster zu den mehreren Orten zu bewegen, die an oder überall in dem imaginären Würfel verteilt sind, d) Empfangen mehrerer Kalibrierbilder von der Kamera über die Kommunikationsschnittstelle, wobei die mehreren Kalibrierbilder durch die Kamera erfasst werden und entsprechende Bilder des Kalibriermusters an den mehreren Orten sind, e) Bestimmen entsprechender Abschätzungen von intrinsischen Kameraparametern basierend auf den mehreren Kalibrierbildern und f) Bestimmen, basierend auf den entsprechenden Abschätzungen der intrinsischen Kameraparameter: einer Abschätzung einer Transformationsfunktion, die eine Beziehung zwischen einem Kamerakoordinatensystem und einem Weltkoordinatensystem beschreibt, wobei das Kamerakoordinatensystem ein Koordinatensystem ist, das in Bezug auf einen Ort und eine Ausrichtung der Kamera definiert ist, und das Weltkoordinatensystem ein Koordinatensystem ist, das in Bezug auf einen Ort definiert ist, der relativ zu der Basis des Roboters stationär ist. Die Steuerschaltung ist ferner konfiguriert, nachdem die Kamerakalibrierung ausgeführt ist, über die Kommunikationsschnittstelle ein anschließendes Bild von der Kamera zu empfangen und durch Ausgeben über die Kommunikationsschnittstelle an den Roboter eines anschließenden Bewegungsbefehls, der auf dem anschließenden Bild und auf der Abschätzung der Transformationsfunktion basiert, eine Platzierung des Roboterarms zu steuern.

[0133] Die Ausführungsform A2 umfasst das Robotersteuersystem der Ausführungsform A1, wobei die mehreren Orte an oder überall in dem imaginären Würfel einheitlich verteilt sind.

[0134] Die Ausführungsform A3 umfasst das Robotersteuersystem der Ausführungsform A2, wobei die mehreren Orte wie gemessen entlang einer Kante des imaginären Würfels zwischen unmittelbar angrenzenden Orten der mehreren Orte einen einheitlichen Abstand aufweisen.

[0135] Die Ausführungsform A4 umfasst das Robotersteuersystem von irgendwelchen der Ausführungsformen A1 bis A3, wobei die Steuerschaltung konfiguriert ist, den Roboterarm so zu steuern, dass er als Reaktion

auf eine Bestimmung, dass der Roboterarm das Kalibriermuster zu allen Eckorten des imaginären Würfels bewegen kann, das Kalibriermuster zu den mehreren Orten bewegt.

[0136] Die Ausführungsform A5 umfasst das Robotersteuersystem der Ausführungsform A4, wobei die Steuerschaltung konfiguriert ist, den Roboterarm so zu steuern, dass er das Kalibriermuster nur zu den mehreren Orten bewegt als Reaktion auf: (a) die Bestimmung, dass der Roboterarm das Kalibriermuster zu allen Eckorten des imaginären Würfels bewegen kann und (b) eine Bestimmung, dass der Roboterarm an jedem Eckort von allen Eckorten des imaginären Würfels das Kalibriermuster in einen Winkel neigen kann, der sich relativ zur Kamera innerhalb eines definierten Winkelbereichs befindet.

[0137] Die Ausführungsform A6 umfasst das Robotersteuersystem der Ausführungsform A5, wobei der imaginäre Würfel ein zweiter durch die Steuerschaltung bestimmter imaginärer Würfel ist. Bei dieser Ausführungsform ist die Steuerschaltung ferner konfiguriert, einen ersten imaginären Würfel zu bestimmen, der in das Kamerasichtfeld passt. Die Steuerschaltung ist ferner konfiguriert, zu bestimmen, dass der Roboterarm das Kalibriermuster nicht zu einem oder mehreren Eckorten des ersten imaginären Würfels bewegen kann, oder dass der Roboterarm für einen oder mehrere Eckorte des ersten imaginären Würfels das Kalibriermuster nicht in einen Winkel neigen kann, der sich relativ zur Kamera innerhalb des definierten Winkelbereichs befindet. Die Steuerschaltung ist konfiguriert, alle Eckorte des zweiten imaginären Würfels zu bestimmen als Reaktion auf mindestens eines von: (a) einer Bestimmung, dass der Roboterarm das Kalibriermuster nicht zu einem oder mehreren Eckorten des ersten imaginären Würfels bewegen kann oder (b) der Roboterarm für einen oder mehrere Eckorte des ersten imaginären Würfels das Kalibriermuster nicht in einen Winkel neigen kann, der sich relativ zur Kamera innerhalb des definierten Winkelbereichs befindet.

[0138] Die Ausführungsform A7 umfasst das Robotersteuersystem der Ausführungsform A6, wobei der erste imaginäre Würfel ein maximal dimensionierter imaginärer Würfel ist, der in das Kamerasichtfeld passen kann, und wobei der zweite imaginäre Würfel kleiner ist als der erste imaginäre Würfel.

[0139] Die Ausführungsform A8 umfasst das Robotersteuersystem von irgendeiner der Ausführungsformen A1 bis A7, wobei die mehreren Orte genau n^3 Orte umfassen, wobei n eine ganze Zahl gleich oder größer als 2 ist.

[0140] Die Ausführungsform A9 umfasst das Robotersteuersystem von irgendeiner der Ausführungsformen A1 bis A8, wobei die Steuerschaltung konfiguriert ist, den Roboterarm über die Bewegungsbefehle zu steuern, um das Kalibriermuster relativ zur Kamera in unterschiedliche entsprechende Winkel für die mehreren Orte zu neigen, die einheitlich an oder überall in dem imaginären Würfel verteilt sind, sodass die mehreren entsprechenden Kalibrierbilder das Kalibriermuster in unterschiedlichen entsprechenden Winkeln relativ zur Kamera erfassen.

[0141] Die Ausführungsform A10 umfasst das Robotersteuersystem von irgendeiner der Ausführungsformen A1 bis A9, wobei das Kalibriermuster mehrere Musterelemente umfasst, und wobei die Steuerschaltung konfiguriert ist, ein erstes Kalibrierbild von der Kamera zu empfangen, bevor die mehreren Kalibrierbilder empfangen werden, wobei das erste Kalibrierbild ein Bild des Kalibrierusters ist und durch die Kamera erfasst wird, bevor die mehreren entsprechenden Kalibrierbilder erfasst werden. Die Steuerschaltung ist ferner konfiguriert, ein Intensitätsniveau und ein Kontrastniveau von mindestens einem der Musterelemente in dem ersten Kalibrierbild zu bestimmen und entsprechende Werte eines Belichtungsparameters und einen Bildschärfeparameter der Kamera basierend auf mindestens einem von dem Intensitätsniveau und dem Kontrastniveau von mindestens einem der Musterelemente in dem ersten Kalibrierbild zu bestimmen. Die mehreren entsprechenden Kalibrierbilder werden durch die Kamera mit den entsprechenden Werten des Belichtungsparameters und des Bildschärfeparameters erfasst.

[0142] Die Ausführungsform A11 umfasst das Robotersteuersystem von irgendeiner der Ausführungsformen A4 bis A10, wobei die Steuerschaltung konfiguriert ist, durch Teilen des imaginären Würfels in mehrere sich nicht überlappende Regionen und durch Zuordnen eines entsprechenden Orts der mehreren Orte, sodass er sich in jeder Region der mehreren sich nicht überlappenden Regionen befindet, die mehreren Orte zu bestimmen.

[0143] Die Ausführungsform A12 umfasst das Robotersteuersystem von irgendeiner der Ausführungsformen A4 bis A11, wobei die Steuerschaltung konfiguriert ist, die mehreren Orte über eine Reihe von Iterationen zu bestimmen, wobei ein erster Ort der mehreren Orte als irgendein Ort innerhalb des imaginären Würfels bestimmt wird und während einer ersten Iteration der Reihe von Iterationen bestimmt wird, wobei der imaginäre Würfel

eine erste Region bildet, die verwendet wird, um die erste Iteration auszuführen. Bei dieser Ausführungsform werden entsprechende Orte für die verbleibenden Iterationen bestimmt durch Ausführen des Folgenden für jede der verbleibenden Iterationen: (a) Teilen einer Region, die verwendet wird, um eine vorhergehende Iteration auszuführen, in eine erste halbe Region und eine zweite halbe Region, die sich nicht überlappen, wobei jede der ersten halben Region und der zweiten halben Region eine Region ist, die verwendet wird, um eine gegenwärtige Iteration auszuführen, (b) Bestimmen, welche der ersten halben Region und der zweiten halben Region einen vorherigen Ort enthält, wobei der vorherige Ort ein entsprechender Ort der mehreren Orte ist, die in der vorhergehenden Iteration bestimmt wurden, (c) und Bestimmen von jedem Ort innerhalb der anderen ersten halben Region und zweiten halben Region als ein gegenwärtiger Ort, wobei der gegenwärtige Ort ein Ort der mehreren Orte ist, die für die gegenwärtige Iteration bestimmt sind.

[0144] Die Ausführungsform A13 betrifft ein Verfahren zum Ausführen eines Robotersteuersystems. Bei dieser Ausführungsform umfasst das Verfahren a) Bestimmen, durch ein Robotersteuersystem, von auf ein Kamerasichtfeld hinweisenden Informationen, wobei das Robotersteuersystem eine Kommunikationsschnittstelle umfasst, die konfiguriert ist, mit einer Kamera und mit einem Roboter mit einer Basis, einem Roboterarm und einem auf dem Roboterarm angeordneten Kalibriermuster zu kommunizieren, wobei das Kamerasichtfeld ein Sichtfeld der Kamera ist; b) Bestimmen, durch das Robotersteuersystem, aller Eckorte eines imaginären Würfels, der in das Kamerasichtfeld passt; c) Bestimmen, durch das Robotersteuersystem, mehrerer Orte, die an oder überall in dem imaginären Würfel verteilt sind; d) Ausgeben, durch das Robotersteuersystem, von Bewegungsbefehlen an die Kommunikationsschnittstelle, wobei die Kommunikationsschnittstelle konfiguriert ist, die Bewegungsbefehle zu dem Roboter zu kommunizieren, um zu bewirken, dass der Roboterarm das Kalibriermuster zu den mehreren Orten bewegt, die an oder überall in dem imaginären Würfel verteilt sind; e) Empfangen, durch das Robotersteuersystem, mehrerer Kalibrierbilder von der Kommunikationsschnittstelle, wobei die Kommunikationsschnittstelle konfiguriert ist, die mehreren Kalibrierbilder von der Kamera zu empfangen, und wobei die mehreren Kalibrierbilder durch die Kamera erfasst werden und mehrere von entsprechenden Bildern des Kalibrierusters an den mehreren Orten sind; f) Bestimmen, durch das Robotersteuersystem, entsprechender Abschätzungen von intrinsischen Kameraparametern basierend auf den mehreren Kalibrierbildern; g) Bestimmen, durch das Robotersteuersystem, basierend auf den entsprechenden Abschätzungen der intrinsischen Kameraparameter, einer Abschätzung einer Transformationsfunktion, die eine Beziehung zwischen einem Kamerakoordinatensystem und einem Weltkoordinatensystem beschreibt, wobei das Kamerakoordinatensystem ein Koordinatensystem ist, das in Bezug auf einen Ort und eine Ausrichtung der Kamera definiert ist, mit der zu kommunizieren die Kommunikationsschnittstelle konfiguriert ist, und das Weltkoordinatensystem ein Koordinatensystem ist, das in Bezug auf einen Ort definiert ist, der relativ zu der Basis des Roboters stationär ist, mit dem zu kommunizieren die Kommunikationsschnittstelle konfiguriert ist; h) Empfangen, durch das Robotersteuersystem, eines anschließenden Bilds von der Kommunikationsschnittstelle, wobei die Kommunikationsschnittstelle konfiguriert ist, das anschließende Bild von der Kamera nach dem Bestimmen der entsprechenden Abschätzungen der intrinsischen Kameraparameter und der Abschätzung der Transformationsfunktion zu empfangen; i) Erzeugen, durch das Robotersteuersystem, eines anschließenden Bewegungsbefehls basierend auf dem anschließenden Bild und basierend auf der Abschätzung der Transformationsfunktion; und j) Ausgeben, durch das Robotersteuersystem, des anschließenden Bewegungsbefehls an die Kommunikationsschnittstelle, wobei die Kommunikationsschnittstelle konfiguriert ist, den anschließenden Bewegungsbefehl zu dem Roboter zu kommunizieren, um die Platzierung des Roboterarms zu steuern.

[0145] Die Ausführungsform A14 betrifft ein nicht flüchtiges computerlesbares Medium mit darauf gespeicherten Befehlen, die bei Ausführung durch eine Steuerschaltung eines Robotersteuersystems bewirken, dass die Steuerschaltung eine Kamerakalibrierung ausführt durch: a) Bestimmen von auf ein Kamerasichtfeld hinweisenden Informationen, wobei das Robotersteuersystem eine Kommunikationsschnittstelle umfasst, die konfiguriert ist, mit einer Kamera und mit einem Roboter mit einer Basis, einem Roboterarm und einem auf dem Roboterarm angeordneten Kalibriermuster zu kommunizieren, wobei das Kamerasichtfeld ein Sichtfeld der Kamera ist, b) Bestimmen aller Eckorte eines imaginären Würfels, der in das Kamerasichtfeld passt, c) Bestimmen mehrerer Orte, die an oder überall in dem imaginären Würfel verteilt sind, d) Ausgeben von Bewegungsbefehlen an die Kommunikationsschnittstelle, wobei die Kommunikationsschnittstelle konfiguriert ist, die Bewegungsbefehle zu dem Roboter zu kommunizieren, um zu bewirken, dass der Roboterarm das Kalibriermuster zu den mehreren Orten bewegt, die an oder überall in dem imaginären Würfel verteilt sind, e) Empfangen mehrerer Kalibrierbilder von der Kommunikationsschnittstelle, wobei die Kommunikationsschnittstelle konfiguriert ist, die mehreren Kalibrierbilder von der Kamera zu empfangen, und wobei die mehreren Kalibrierbilder durch die Kamera erfasst werden und mehrere entsprechende Bilder des Kalibrierusters an den mehreren Orten sind, f) Bestimmen entsprechender Abschätzungen von intrinsischen Kameraparametern basierend auf den mehreren Kalibrierbildern, g) Bestimmen, basierend auf den entsprechenden Abschätzungen der intrinsischen Kameraparameter, einer Abschätzung einer Transformationsfunktion, die eine Beziehung zwischen

einem Kamerakoordinatensystem und einem Weltkoordinatensystem beschreibt, wobei das Kamerakoordinatensystem ein Koordinatensystem in Bezug auf einen Ort und eine Ausrichtung der Kamera definiert, mit der zu kommunizieren die Kommunikationsschnittstelle konfiguriert ist, und das Weltkoordinatensystem ein Koordinatensystem in Bezug auf einen Ort definiert, der relativ zu der Basis des Roboters stationär ist, mit dem zu kommunizieren die Kommunikationsschnittstelle konfiguriert ist. Die Befehle bewirken bei Ausführung durch die Steuerschaltung ferner, dass die Steuerschaltung ein anschließendes Bild von der Kommunikationsschnittstelle empfängt, wobei die Kommunikationsschnittstelle konfiguriert ist, das anschließende Bild von der Kamera nach dem Bestimmen der entsprechenden Abschätzungen der intrinsischen Kameraparameter und der Abschätzung der Transformationsfunktion zu empfangen. Die Steuerschaltung ist zudem konfiguriert, eine Platzierung des Roboterarms durch das Ausgeben eines anschließenden Bewegungsbefehls an den Roboter über die Kommunikationsschnittstelle, der auf dem anschließenden Bild und auf der Abschätzung der Transformationsfunktion basiert, zu steuern.

[0146] Die Ausführungsform B 1 betrifft ein Robotersteuersystem, das eine Kommunikationsschnittstelle und eine Steuerschaltung umfasst. Die Kommunikationsschnittstelle ist konfiguriert, zu kommunizieren mit: einem Roboter mit einer Basis und einem Roboterarm mit einem darauf angeordneten Kalibrieremuster und einer Kamera mit einem Kamerasisichtfeld. Das Kalibrieremuster umfasst mehrere Musterelemente mit entsprechenden definierten Musterelementorten in einem Musterkoordinatensystem, wobei das Musterkoordinatensystem ein Koordinatensystem ist, das in Bezug auf einen Ort und eine Ausrichtung des Kalibrieremusters definiert ist. Die Steuerschaltung ist konfiguriert, eine Kamerakalibrierung auszuführen durch: a) Steuern des Roboterarms durch Ausgeben eines Bewegungsbefehls über die Kommunikationsschnittstelle an den Roboter, um das Kalibrieremuster zu mindestens einem Ort innerhalb des Kamerasisichtfelds zu bewegen, b) Empfangen eines Kalibrierbildes von der Kamera über die Kommunikationsschnittstelle, wobei das Kalibrierbild durch die Kamera erfasst wird und ein Bild des Kalibrieremusters an dem mindestens einen Ort ist, c) Bestimmen mehrerer Bildmusterelementorte, die entsprechende Orte anzeigen, an denen die mehreren Musterelemente im Kalibrierbild erscheinen, d) Bestimmen einer ersten Abschätzung eines ersten intrinsischen Kameraparameters basierend auf den mehreren Bildmusterelementorten und basierend auf den definierten Musterelementorten, e) Bestimmen einer ersten Abschätzung eines zweiten intrinsischen Kameraparameters basierend auf der ersten Abschätzung des ersten intrinsischen Kameraparameters und basierend auf den mehreren Bildmusterelementorten, nachdem die erste Abschätzung des ersten intrinsischen Kameraparameters bestimmt wurde, f) Bestimmen einer zweiten Abschätzung des ersten intrinsischen Kameraparameters und einer zweiten Abschätzung des zweiten intrinsischen Kameraparameters basierend auf der ersten Abschätzung des zweiten intrinsischen Kameraparameters und basierend auf den mehreren Musterelementorten und den definierten Musterelementorten und g) Bestimmen, basierend auf der zweiten Abschätzung des ersten intrinsischen Kameraparameters und der zweiten Abschätzung des zweiten intrinsischen Kameraparameters, einer Abschätzung einer Transformationsfunktion, die eine Beziehung zwischen einem Kamerakoordinatensystem und einem Weltkoordinatensystem beschreibt, wobei das Kamerakoordinatensystem ein Koordinatensystem ist, das in Bezug auf einen Ort und eine Ausrichtung der Kamera definiert ist, und das Weltkoordinatensystem ein Koordinatensystem ist, das in Bezug auf einen Ort definiert ist, der relativ zu der Basis des Roboters stationär ist. Die Steuerschaltung ist ferner konfiguriert, nachdem die Kamerakalibrierung ausgeführt ist, ein anschließendes Bild von der Kamera zu empfangen und eine Platzierung des Roboterarms durch Ausgeben eines anschließenden Bewegungsbefehls an den Roboter, der auf dem anschließenden Bild und auf der Abschätzung der Transformationsfunktion basiert, zu steuern.

[0147] Die Ausführungsform B2 umfasst das Robotersteuersystem der Ausführungsform B1, wobei die Transformationsfunktion eine zweite Transformationsfunktion ist, und wobei die Steuerschaltung konfiguriert ist, die Kamerakalibrierung durch das weitere Bestimmen einer Abschätzung einer ersten Transformationsfunktion, die eine Beziehung zwischen dem Musterkoordinatensystem und dem Kamerakoordinatensystem beschreibt, basierend auf der zweiten Abschätzung des ersten intrinsischen Kameraparameters und der zweiten Abschätzung des zweiten intrinsischen Kameraparameters auszuführen, wobei die zweite Transformationsfunktion basierend auf der ersten Transformationsfunktion bestimmt wird.

[0148] Die Ausführungsform B3 umfasst das Robotersteuersystem der Ausführungsform B1 oder B2, wobei die Kamera eine Linse und einen Bildsensor umfasst, und wobei der erste intrinsische Kameraparameter eine Projektionsmatrix ist, die eine Bildprojektion auf den Bildsensor beschreibt, und wobei der zweite intrinsische Kameraparameter ein Verzerrungsparameter ist, der eine durch die Linse verursachte Verzerrung beschreibt.

[0149] Die Ausführungsform B4 umfasst das Robotersteuersystem von irgendeiner der Ausführungsformen B1 bis B3. Bei dieser Ausführungsform ist die Steuerschaltung konfiguriert, die erste Abschätzung des zweiten intrinsischen Kameraparameters zu bestimmen durch: (a) Bestimmen einer anfänglichen Abschätzung

des zweiten intrinsischen Kameraparameters, (b) Erzeugen, basierend auf der anfänglichen Abschätzung des zweiten intrinsischen Kameraparameters, der ersten Abschätzung des ersten intrinsischen Kameraparameters und dem Kalibrierbild, einer modifizierten Version des Kalibrierbilds, das gegenüber der Verzerrung kompensiert, die durch die Linse bewirkt wird, (c) Bestimmen eines Krümmungsbetrags bei der modifizierten Version des Kalibrierbilds, (d) Anpassen der anfänglichen Abschätzung des zweiten intrinsischen Kameraparameters basierend auf dem Krümmungsbetrag bei der modifizierten Version des Kalibrierbilds, um eine angepasste Abschätzung des zweiten intrinsischen Kameraparameters zu erzeugen, die den Krümmungsbetrag reduziert, wobei die angepasste Abschätzung die erste Abschätzung des zweiten intrinsischen Kameraparameters ist.

[0150] Die Ausführungsform B5 umfasst das Robotersteuersystem der Ausführungsform B4, wobei die mehreren Musterelemente des Kalibriermusters mehrere Punkte sind, und wobei die Steuerschaltung konfiguriert ist, den Krümmungsbetrag zu bestimmen durch: Anpassen mehrerer gerader Linien durch die mehreren Punkte in der modifizierten Version des Kalibrierbilds und Bestimmen des Krümmungsbetrags basierend auf entsprechenden Abständen zwischen jeder geraden Linie der mehreren geraden Linien und entsprechender Punkte der mehreren Punkte, durch welche die gerade Linie angepasst wurde.

[0151] Die Ausführungsform B6 umfasst das Robotersteuersystem von irgendeiner der Ausführungsformen B2 bis B5. Bei dieser Ausführungsform ist die Steuerschaltung ferner konfiguriert, eine dritte Abschätzung des zweiten intrinsischen Kameraparameters und eine dritte Abschätzung des ersten intrinsischen Kameraparameters zu bestimmen durch: (a) Bestimmen eines simulierten Kalibrierbilds, das ein simuliertes Bild des Kalibriermusters ist, basierend auf der Abschätzung der ersten Transformationsfunktion, der zweiten Abschätzung des zweiten intrinsischen Kameraparameters und der zweiten Abschätzung des ersten intrinsischen Kameraparameters, (b) Bestimmen einer Differenz zwischen dem simulierten Kalibrierbild und dem durch die Kamera erfassten Kalibrierbild, (c) Anpassen der zweiten Abschätzung des zweiten intrinsischen Kameraparameters und der zweiten Abschätzung des ersten intrinsischen Kameraparameters basierend auf der Differenz, um eine angepasste Abschätzung des zweiten intrinsischen Kameraparameters und eine angepasste Abschätzung des ersten intrinsischen Kameraparameters zu erzeugen, welche die Differenz reduziert, wobei die angepasste Abschätzung des zweiten intrinsischen Kameraparameters die dritte Abschätzung davon ist und die angepasste Abschätzung des ersten intrinsischen Kameraparameters die dritte Abschätzung davon ist. Bei dieser Ausführungsform wird ferner die Abschätzung der ersten Transformationsfunktion basierend auf der dritten Abschätzung des zweiten intrinsischen Kameraparameters und der dritten Abschätzung des ersten intrinsischen Kameraparameters bestimmt.

[0152] Die Ausführungsform B7 umfasst das Robotersteuersystem von irgendeiner der Ausführungsformen B2 bis B6, wobei der Roboterarm ein Gelenk umfasst, an dem das Kalibriermuster angeordnet ist. Bei dieser Ausführungsform ist die Steuerschaltung konfiguriert, die Kamerakalibrierung weiter auszuführen durch: Bestimmen einer Abschätzung einer dritten Transformationsfunktion, die eine Beziehung zwischen dem Weltkoordinatensystem und einem Gelenkkoordinatensystem beschreibt, wobei das Gelenkkoordinatensystem ein Koordinatensystem ist, das in Bezug auf einen Ort an dem Gelenk definiert ist, und Bestimmen einer Abschätzung einer vierten Transformationsfunktion, die eine Beziehung zwischen dem Musterkoordinatensystem und dem Gelenkkoordinatensystem beschreibt, wobei sowohl die Abschätzung der zweiten Transformationsfunktion als auch die Abschätzung der vierten Transformationsfunktion basierend auf der Abschätzung der ersten Transformationsfunktion und der Abschätzung der dritten Transformationsfunktion bestimmt wird.

[0153] Die Ausführungsform B8 umfasst das Robotersteuersystem der Ausführungsform B7, wobei die Steuerschaltung konfiguriert ist, die Kamerakalibrierung ferner auszuführen durch: a) Bestimmen eines simulierten Kalibrierbilds, das ein simuliertes Bild des Kalibriermusters ist, basierend auf der Abschätzung der vierten Transformationsfunktion, der Abschätzung der dritten Transformationsfunktion, der Abschätzung der zweiten Transformation und der zweiten Abschätzung des ersten intrinsischen Kameraparameters, b) Bestimmen, basierend auf der zweiten Abschätzung des zweiten intrinsischen Kameraparameters, einer modifizierten Version des durch die Kamera erfassten Kalibrierbilds, um die Verzerrung zu kompensieren, die durch die Linse der Kamera verursacht wird, c) Bestimmen einer Differenz zwischen dem simulierten Kalibrierbild und der modifizierten Version des Kalibrierbilds und d) Anpassen von mindestens der Abschätzung der vierten Transformationsfunktion und der Abschätzung der zweiten Transformationsfunktion, um die Differenz zwischen dem simulierten Kalibrierbild und der modifizierten Version des Kalibrierbilds zu reduzieren.

[0154] Die Ausführungsform B9 umfasst das Robotersteuersystem von irgendeiner der Ausführungsformen B1 bis B8, wobei die Kamera, mit der zu kommunizieren die Kommunikationsschnittstelle konfiguriert ist, eine erste Kamera ist und das Kamerakordinatensystem ein erstes Kamerakordinatensystem ist und die Kommunikationsschnittstelle konfiguriert ist, mit einer zweiten Kamera zu kommunizieren. Bei dieser Ausführungs-

form ist die Steuerschaltung konfiguriert, die Kamerakalibrierung durch weiteres Bestimmen einer Beziehung zwischen dem ersten Kamerakoordinatensystem und einem zweiten Kamerakoordinatensystem auszuführen, wobei das zweite Kamerakoordinatensystem in Bezug auf einen Ort und eine Ausrichtung der zweiten Kamera definiert ist.

[0155] Die Ausführungsform B10 betrifft ein Verfahren zum Ausführen einer Robotersteuerung, wobei das Verfahren umfasst: a) Erzeugen, durch ein Robotersteuersystem, eines Bewegungsbefehls zum Ausgeben an eine Kommunikationsschnittstelle des Robotersteuersystems, wobei die Kommunikationsschnittstelle konfiguriert ist, mit einem Roboter mit einer Basis und einem Roboterarm mit einem darauf angeordneten Kalibriermuster zu kommunizieren, und konfiguriert ist, mit einer Kamera mit einem Kamerasichtfeld zu kommunizieren; b) Ausgeben, durch das Robotersteuersystem, des Bewegungsbefehls an die Kommunikationsschnittstelle, wobei die Kommunikationsschnittstelle konfiguriert ist, den Bewegungsbefehl zu dem Roboter zu kommunizieren, um zu bewirken, dass der Roboterarm das Kalibriermuster zu mindestens einem Ort in dem Kamerasichtfeld bewegt; c) Empfangen, durch das Robotersteuersystem, eines Kalibrierbilds von der Kommunikationsschnittstelle, wobei die Kommunikationsschnittstelle konfiguriert ist, das Kalibrierbild von der Kamera zu empfangen, und das Kalibrierbild ein Bild des Kalibrierusters an dem mindestens einen Ort in dem Kamerasichtfeld ist, und wobei das Kalibriermuster mehrere Musterelemente mit entsprechenden definierten Musterelementorten in einem Musterkoordinatensystem umfasst, wobei das Musterkoordinatensystem ein Koordinatensystem ist, das in Bezug auf einen Ort und eine Ausrichtung des Kalibrierusters definiert ist; d) Bestimmen, durch das Robotersteuersystem, mehrerer Bildmuster-elementorte von dem Kalibrierbild, wobei die mehreren Bildmuster-elementorte entsprechende Orte anzeigen, an denen die mehreren Musterelemente in dem Kalibrierbild erscheinen; e) Bestimmen, durch das Robotersteuersystem, einer ersten Abschätzung eines ersten intrinsischen Kameraparameters basierend auf den mehreren Bildmuster-elementorten und basierend auf den definierten Musterelementorten; f) Bestimmen, durch das Robotersteuersystem, nachdem die erste Abschätzung des ersten intrinsischen Kameraparameters bestimmt wurde, einer ersten Abschätzung eines zweiten intrinsischen Kameraparameters basierend auf der ersten Abschätzung des ersten intrinsischen Kameraparameters und basierend auf den mehreren Bildmuster-elementorten; g) Bestimmen, durch das Robotersteuersystem, einer zweiten Abschätzung des ersten intrinsischen Kameraparameters und einer zweiten Abschätzung des zweiten intrinsischen Kameraparameters basierend auf der ersten Abschätzung des zweiten intrinsischen Kameraparameters und basierend auf den mehreren Bildmuster-elementorten und den definierten Musterelementorten; h) Bestimmen, durch das Robotersteuersystem, basierend auf der zweiten Abschätzung des ersten intrinsischen Kameraparameters und der zweiten Abschätzung des zweiten intrinsischen Kameraparameters, einer Abschätzung einer Transformationsfunktion, die eine Beziehung zwischen einem Kamerakoordinatensystem und einem Weltkoordinatensystem beschreibt, wobei das Kamerakoordinatensystem ein Koordinatensystem ist, das in Bezug auf einen Ort und eine Ausrichtung der Kamera definiert ist, mit der zu kommunizieren die Kommunikationsschnittstelle konfiguriert ist, und das Weltkoordinatensystem ein Koordinatensystem ist, das in Bezug auf einen Ort definiert ist, der relativ zu der Basis des Roboters stationär ist, mit dem zu kommunizieren die Kommunikationsschnittstelle konfiguriert ist; i) Empfangen, durch das Robotersteuersystem, eines anschließenden Bilds von der Kommunikationsschnittstelle, wobei die Kommunikationsschnittstelle konfiguriert ist, das anschließende Bild von der Kamera zu empfangen, nachdem die Abschätzung der Transformationsfunktion bestimmt wurde; j) Erzeugen, durch das Robotersteuersystem, eines anschließenden Bewegungsbefehls basierend auf dem anschließenden Bild und basierend auf der Abschätzung der Transformationsfunktion; und k) Ausgeben, durch das Robotersteuersystem, des anschließenden Bewegungsbefehls an die Kommunikationsschnittstelle, wobei die Kommunikationsschnittstelle konfiguriert ist, den anschließenden Bewegungsbefehl an den Roboter auszugeben, um eine Platzierung des Roboterarms zu steuern.

[0156] Die Ausführungsform B11 betrifft ein nicht flüchtiges computerlesbares Medium mit darauf gespeicherten Befehlen, die bei Ausführung durch eine Steuerschaltung eines Robotersteuersystems, bewirken, dass die Steuerschaltung eine Kamerakalibrierung ausführt, durch a) Erzeugen eines Bewegungsbefehls, zum Ausgeben an eine Kommunikationsschnittstelle des Robotersteuersystems, wobei die Kommunikationsschnittstelle konfiguriert ist, mit einem Roboter mit einer Basis und einem Roboterarm mit einem darauf angeordneten Kalibriermuster und mit einer Kamera mit einem Kamerasichtfeld zu kommunizieren; b) Ausgeben des Bewegungsbefehls zu der Kommunikationsschnittstelle, wobei die Kommunikationsschnittstelle konfiguriert ist, den Bewegungsbefehl zu dem Roboter zu kommunizieren, um zu bewirken, dass der Roboterarm das Kalibriermuster zu mindestens einem Ort in dem Kamerasichtfeld bewegt; c) Empfangen eines Kalibrierbilds von der Kommunikationsschnittstelle, wobei die Kommunikationsschnittstelle konfiguriert ist, das Kalibrierbild von der Kamera zu empfangen, wobei das Kalibrierbild ein Bild des Kalibrierusters an dem mindestens einen Ort im Kamerasichtfeld ist, und wobei das Kalibriermuster mehrere Musterelemente mit entsprechenden definierten Musterelementorten in einem Musterkoordinatensystem umfasst, wobei das Musterkoordinatensystem ein Koordinatensystem ist, das in Bezug auf einen Ort und eine Ausrichtung des Kalibrierusters definiert ist;

d) Bestimmen mehrerer Bildmusterelementorte von dem Kalibrierbild, wobei die mehreren Bildmusterelementorte entsprechende Orte anzeigen, an denen die mehreren Musterelemente im Kalibrierbild erscheinen; e) Bestimmen einer ersten Abschätzung eines ersten intrinsischen Kameraparameters, der auf den mehreren Bildmusterelementorten und auf den definierten Musterelementorten basiert; f) Bestimmen, nachdem die erste Abschätzung des ersten intrinsischen Kameraparameters bestimmt wurde, einer ersten Abschätzung eines zweiten intrinsischen Kameraparameters basierend auf der ersten Abschätzung des ersten intrinsischen Kameraparameters und basierend auf den mehreren Bildmusterelementorten; g) Bestimmen einer zweiten Abschätzung des ersten intrinsischen Kameraparameters und einer zweiten Abschätzung des zweiten intrinsischen Kameraparameters basierend auf der ersten Abschätzung des zweiten intrinsischen Kameraparameters und basierend auf den mehreren Bildmusterelementorten und den definierten Musterelementorten; h) Bestimmen, basierend auf der zweiten Abschätzung des ersten intrinsischen Kameraparameters und der zweiten Abschätzung des zweiten intrinsischen Kameraparameters einer Abschätzung einer Transformationsfunktion, die eine Beziehung zwischen einem Kamerakoordinatensystem und einem Weltkoordinatensystem beschreibt, wobei das Kamerakoordinatensystem ein Koordinatensystem ist, das in Bezug auf einen Ort und eine Ausrichtung der Kamera definiert ist, mit der zu kommunizieren die Kommunikationsschnittstelle konfiguriert ist, und das Weltkoordinatensystem ein Koordinatensystem ist, das in Bezug auf einen Ort definiert ist, der relativ zu der Basis des Roboters stationär ist, mit dem zu kommunizieren die Kommunikationsschnittstelle konfiguriert ist. Die Befehle veranlassen bei Ausführung durch die Steuerschaltung ferner, dass die Steuerschaltung ein anschließendes Bild von der Kommunikationsschnittstelle empfängt, wobei die Kommunikationsschnittstelle konfiguriert ist, das anschließende Bild von der Kamera zu empfangen, nachdem die Kamerakalibrierung ausgeführt ist, und eine Platzierung des Roboterarms durch Ausgeben eines anschließenden Bewegungsbefehls, der auf dem anschließenden Bild und auf der Abschätzung der Transformationsfunktion basiert, an den Roboter über die Kommunikationsschnittstelle steuert.

Patentansprüche

1. Robotersteuersystem (110), umfassend:

eine Kommunikationsschnittstelle (113), die konfiguriert ist, mit einem Roboter (150, 250, 350, 450) und mit einer Kamera (170, 180, 270, 370, 370A, 470) mit einem Kamerasichtfeld zu kommunizieren, wobei der Roboter (150, 250, 350, 450) eine Basis und einen Roboterarm mit einem darauf angeordneten Kalibriermuster (160, 260, 360, 460) aufweist; und

eine Steuerschaltung (111), die konfiguriert ist, eine Kamerakalibrierung auszuführen durch:

Bestimmen aller Eckorte eines imaginären Würfels, der in das Kamerasichtfeld passt,

Bestimmen mehrerer Orte, die an oder überall in dem imaginären Würfel verteilt sind,

Steuern des Roboterarms, um das Kalibriermuster (160, 260, 360, 460) zu den mehreren Orten zu bewegen, die an oder überall in dem imaginären Würfel verteilt sind, durch Ausgeben von Bewegungsbefehlen an den Roboter (150, 250, 350, 450) über die Kommunikationsschnittstelle (113),

Empfangen mehrerer Kalibrierbilder von der Kamera (170, 180, 270, 370, 370A, 470) über die Kommunikationsschnittstelle (113), wobei die mehreren Kalibrierbilder durch die Kamera (170, 180, 270, 370, 370A, 470) erfasst werden und entsprechende Bilder des Kalibriermusters (160, 260, 360, 460) an den mehreren Orten sind,

Bestimmen entsprechender Abschätzungen von intrinsischen Kameraparametern basierend auf den mehreren Kalibrierbildern und

Bestimmen basierend auf den entsprechenden Abschätzungen der intrinsischen Kameraparameter: einer Abschätzung einer Transformationsfunktion, die eine Beziehung zwischen einem Kamerakoordinatensystem und einem Weltkoordinatensystem beschreibt, wobei das Kamerakoordinatensystem ein Koordinatensystem ist, das in Bezug auf einen Ort und eine Ausrichtung der Kamera (170, 180, 270, 370, 370A, 470) definiert ist, und das Weltkoordinatensystems ein Koordinatensystem ist, das in Bezug auf einen Ort definiert ist, der relativ zu der Basis des Roboters stationär ist,

wobei die Steuerschaltung (111) ferner konfiguriert ist, nachdem die Kamerakalibrierung ausgeführt ist, über die Kommunikationsschnittstelle (113) ein anschließendes Bild von der Kamera (170, 180, 270, 370, 370A, 470) zu empfangen und durch Ausgeben, über die Kommunikationsschnittstelle (113) an den Roboter (150, 250, 350, 450), eines anschließenden Bewegungsbefehls, der auf dem anschließenden Bild und auf der Abschätzung der Transformationsfunktion basiert, eine Platzierung des Roboterarms zu steuern.

2. Robotersteuersystem (110) nach Anspruch 1, wobei die mehreren Orte einheitlich an oder überall in dem imaginären Würfel verteilt sind.

3. Robotersteuersystem (110) nach Anspruch 2, wobei die mehreren Orte wie gemessen entlang einer Kante des imaginären Würfels zwischen unmittelbar angrenzenden Orten der mehreren Orte einen einheitlichen Abstand aufweisen.

4. Robotersteuersystem (110) nach Anspruch 1, wobei die Steuerschaltung (111) konfiguriert ist, den Roboterarm so zu steuern, dass er als Reaktion auf eine Bestimmung, dass der Roboterarm das Kalibriermuster (160, 260, 360, 460) zu allen Eckorten des imaginären Würfels bewegen kann, das Kalibriermuster (160, 260, 360, 460) zu den mehreren Orten bewegt.

5. Robotersteuersystem (110) nach Anspruch 4, wobei die Steuerschaltung (111) konfiguriert ist, den Roboterarm so zu steuern, dass er das Kalibriermuster (160, 260, 360, 460) nur als Reaktion auf: (a) die Bestimmung, dass der Roboterarm das Kalibriermuster (160, 260, 360, 460) zu allen Eckorten des imaginären Würfels bewegen kann und (b) eine Bestimmung, dass der Roboterarm an jedem Eckort von allen Eckorten des imaginären Würfels das Kalibriermuster (160, 260, 360, 460) in einen Winkel neigen kann, der sich relativ zur Kamera (170, 180, 270, 370, 370A, 470) innerhalb eines definierten Winkelbereichs befindet, zu den mehreren Orten bewegt.

6. Robotersteuersystem (110) nach Anspruch 5, wobei der imaginäre Würfel ein zweiter imaginärer Würfel ist, der durch die Steuerschaltung (111) bestimmt ist, und wobei die Steuerschaltung (111) ferner konfiguriert ist zum

Bestimmen eines ersten imaginären Würfels, der in das Kamerasichtfeld passt,

Bestimmen, dass der Roboterarm das Kalibriermuster (160, 260, 360, 460) nicht zu einem oder mehreren Eckorten des ersten imaginären Würfels bewegen kann, oder dass der Roboterarm für einen oder mehrere Eckorte des ersten imaginären Würfels das Kalibriermuster (160, 260, 360, 460) nicht in einen Winkel neigen kann, der sich relativ zur Kamera (170, 180, 270, 370, 370A, 470) innerhalb des definierten Winkelbereichs befindet,

wobei die Steuerschaltung (111) konfiguriert ist, als Reaktion auf mindestens eines von: (a) einer Bestimmung, dass der Roboterarm das Kalibriermuster (160, 260, 360, 460) nicht zu einem oder mehreren Eckorten des ersten imaginären Würfels bewegen kann oder (b) der Roboterarm für einen oder mehrere Eckorte des ersten imaginären Würfels das Kalibriermuster (160, 260, 360, 460) nicht in einen Winkel neigen kann, der sich relativ zur Kamera (170, 180, 270, 370, 370A, 470) innerhalb des definierten Winkelbereichs befindet, alle Eckorte des zweiten imaginären Würfels zu bestimmen.

7. Robotersteuersystem (110) nach Anspruch 6, wobei der erste imaginäre Würfel ein maximal dimensionierter imaginärer Würfel ist, der in das Kamerasichtfeld passen kann, und wobei der zweite imaginäre Würfel kleiner ist als der erste imaginäre Würfel.

8. Robotersteuersystem (110) nach Anspruch 1, wobei die mehreren Orte genau n^3 Orte umfassen, wobei n eine ganze Zahl gleich oder größer als 2 ist.

9. Robotersteuersystem (110) nach Anspruch 1, wobei die Steuerschaltung (111) konfiguriert ist, den Roboterarm über die Bewegungsbefehle so zu steuern, dass er das Kalibriermuster (160, 260, 360, 460) relativ zur Kamera (170, 180, 270, 370, 370A, 470) in unterschiedliche entsprechende Winkel für die mehreren Orte neigt, die einheitlich an oder überall in dem imaginären Würfel verteilt sind, sodass die mehreren entsprechenden Kalibrierbilder das Kalibriermuster (160, 260, 360, 460) in unterschiedlichen entsprechenden Winkeln relativ zur Kamera (170, 180, 270, 370, 370A, 470) erfassen.

10. Robotersteuersystem (110) nach Anspruch 1, wobei das Kalibriermuster (160, 260, 360, 460) mehrere Musterelemente umfasst, und wobei die Steuerschaltung (111) konfiguriert ist,

ein erstes Kalibrierbild von der Kamera (170, 180, 270, 370, 370A, 470) zu empfangen, bevor die mehreren Kalibrierbilder empfangen werden, wobei das erste Kalibrierbild ein Bild des Kalibrierusters (160, 260, 360, 460) ist und durch die Kamera (170, 180, 270, 370, 370A, 470) erfasst wird, bevor die mehreren entsprechenden Kalibrierbilder erfasst werden,

ein Intensitätsniveau und ein Kontrastniveau von mindestens einem der Musterelemente in dem ersten Kalibrierbild zu bestimmen und

entsprechende Werte eines Belichtungsparameters und eines Bildschärfeparameters der Kamera (170, 180, 270, 370, 370A, 470) basierend auf mindestens einem von dem Intensitätsniveau und dem Kontrastniveau von mindestens einem der Musterelemente in dem ersten Kalibrierbild zu bestimmen,

wobei die mehreren entsprechenden Kalibrierbilder mit den entsprechenden Werten des Belichtungsparameters und des Bildschärfeparameters durch die Kamera (170, 180, 270, 370, 370A, 470) erfasst werden.

11. Robotersteuersystem (110) nach Anspruch 1, wobei die Steuerschaltung (111) konfiguriert ist, die mehreren Orte durch Teilen des imaginären Würfels in mehrere nicht überlappende Regionen und durch Zuordnen eines entsprechenden Orts der mehreren Orte, sodass er sich in jeder Region der mehreren nicht überlappenden Regionen befindet, zu bestimmen.

12. Robotersteuersystem (110) nach Anspruch 1, wobei die Steuerschaltung (111) konfiguriert ist, die mehreren Orte über eine Reihe von Iterationen zu bestimmen, wobei ein erster Ort der mehreren Orte als irgendein Ort innerhalb des imaginären Würfels bestimmt wird und während einer ersten Iteration der Reihe von Iterationen bestimmt wird, wobei der imaginäre Würfel eine erste Region bildet, die verwendet wird, um die erste Iteration auszuführen, und wobei entsprechende Orte für die verbleibenden Iterationen durch Ausführen des Folgenden für jede der verbleibenden Iterationen bestimmt werden: (a) Teilen einer Region, die verwendet wird, um eine vorhergehende Iteration auszuführen, in eine erste halbe Region und eine zweite halbe Region, die sich nicht überlappen, wobei jede der ersten halben Region und der zweiten halben Region eine Region ist, die verwendet wird, eine gegenwärtige Iteration auszuführen, (b) Bestimmen, welche der ersten halben Region und der zweiten halben Region einen vorherigen Ort enthält, wobei der vorherige Ort ein entsprechender Ort der mehreren Orte ist, die in der vorhergehenden Iteration bestimmt wurden, (c) und Bestimmen von jedem Ort innerhalb der anderen ersten halben Region und zweiten halben Region als ein gegenwärtiger Ort, wobei der gegenwärtige Ort ein Ort der mehreren Orte ist, die für die gegenwärtige Iteration bestimmt sind.

13. Verfahren zum Ausführen eines Robotersteuersystems (110), wobei das Verfahren umfasst:
Bestimmen von Informationen durch ein Robotersteuersystem (110), die ein Kamerasichtfeld angeben, wobei das Robotersteuersystem (110) eine Kommunikationsschnittstelle (113) umfasst, die konfiguriert ist, mit einer Kamera (170, 180, 270, 370, 370A, 470) und mit einem Roboter (150, 250, 350, 450) mit einer Basis, einem Roboterarm und einem auf dem Roboterarm angeordneten Kalibriermuster (160, 260, 360, 460) zu kommunizieren, wobei das Kamerasichtfeld ein Sichtfeld der Kamera (170, 180, 270, 370, 370A, 470) ist;
Bestimmen, durch das Robotersteuersystem (110), aller Eckorte eines imaginären Würfels, der in das Kamerasichtfeld passt;
Bestimmen, durch das Robotersteuersystem (110), mehrerer Orte, die an oder überall in dem imaginären Würfel verteilt sind;
Ausgeben, durch das Robotersteuersystem (110), von Bewegungsbefehlen an die Kommunikationsschnittstelle (113), wobei die Kommunikationsschnittstelle (113) konfiguriert ist, die Bewegungsbefehle zum Roboter (150, 250, 350, 450) zu kommunizieren, um den Roboterarm zu veranlassen, das Kalibriermuster (160, 260, 360, 460) zu den mehreren Orten zu bewegen, die an oder überall in dem imaginären Würfel verteilt sind;
Empfangen, durch das Robotersteuersystem (110), mehrerer Kalibrierbilder von der Kommunikationsschnittstelle (113), wobei die Kommunikationsschnittstelle (113) konfiguriert ist, die mehreren Kalibrierbilder von der Kamera (170, 180, 270, 370, 370A, 470) zu empfangen, und wobei die mehreren Kalibrierbilder durch die Kamera (170, 180, 270, 370, 370A, 470) erfasst werden und mehrere entsprechende Bilder der Kalibriermuster (160, 260, 360, 460) an den mehreren Orten sind,
Bestimmen, durch das Robotersteuersystem (110), entsprechender Abschätzungen von intrinsischen Kameraparametern basierend auf den mehreren Kalibrierbildern;
Bestimmen, durch das Robotersteuersystem (110), basierend auf den entsprechenden Abschätzungen der intrinsischen Kameraparameter, einer Abschätzung einer Transformationsfunktion, die eine Beziehung zwischen einem Kamerakoordinatensystem und einem Weltkoordinatensystem beschreibt, wobei das Kamerakoordinatensystem ein Koordinatensystem ist, das in Bezug auf einen Ort und eine Ausrichtung der Kamera (170, 180, 270, 370, 370A, 470) definiert ist, mit der zu kommunizieren die Kommunikationsschnittstelle (113) konfiguriert ist, und das Weltkoordinatensystem ein Koordinatensystem ist, das in Bezug auf einen Ort definiert ist, der relativ zu der Basis des Roboters stationär ist, mit dem zu kommunizieren die Kommunikationsschnittstelle (113) konfiguriert ist;
Empfangen, durch das Robotersteuersystem (110), eines anschließenden Bildes von der Kommunikationsschnittstelle (113), wobei die Kommunikationsschnittstelle (113) konfiguriert ist, nach dem Bestimmen der entsprechenden Abschätzungen der intrinsischen Kameraparameter und der Abschätzung der Transformationsfunktion das anschließende Bild von der Kamera (170, 180, 270, 370, 370A, 470) zu empfangen;
Erzeugen, durch das Robotersteuersystem (110), eines anschließenden Bewegungsbefehls basierend auf dem anschließenden Bild und basierend auf der Abschätzung der Transformationsfunktion; und
Ausgeben, durch das Robotersteuersystem (110), des anschließenden Bewegungsbefehls an die Kommunikationsschnittstelle (113), wobei die Kommunikationsschnittstelle (113) konfiguriert ist, den anschließenden Bewegungsbefehl zu dem Roboter (150, 250, 350, 450) zu kommunizieren, um die Platzierung des Roboterarms zu steuern.

14. Verfahren nach Anspruch 13, wobei die mehreren Orte an oder überall in dem imaginären Würfel einheitlich verteilt sind.

15. Verfahren nach Anspruch 14, wobei die mehreren Orte genau n^3 Orte umfassen, wobei n eine ganze Zahl gleich oder größer als 2 ist.

16. Nicht flüchtiges computerlesbares Medium mit darauf gespeicherten Befehlen, die bei Ausführung durch eine Steuerschaltung (111) eines Robotersteuersystems (110) die Steuerschaltung (111) veranlassen, eine Kamerakalibrierung auszuführen durch:

Bestimmen von Informationen, die ein Kamerasichtfeld angeben, wobei das Robotersteuersystem (110) eine Kommunikationsschnittstelle (113) umfasst, die konfiguriert ist, mit einer Kamera (170, 180, 270, 370, 370A, 470) und mit einem Roboter (150, 250, 350, 450) mit einer Basis, einem Roboterarm und einem auf dem Roboterarm angeordneten Kalibriermuster (160, 260, 360, 460) zu kommunizieren, wobei das Kamerasichtfeld ein Sichtfeld der Kamera (170, 180, 270, 370, 370A, 470) ist,

Bestimmen aller Eckorte eines imaginären Würfels, der in das Kamerasichtfeld passt,

Bestimmen mehrerer Orte, die an oder überall in dem imaginären Würfel verteilt sind,

Ausgeben von Bewegungsbefehlen an die Kommunikationsschnittstelle (113), wobei die Kommunikationsschnittstelle (113) konfiguriert ist, die Bewegungsbefehle zum Roboter (150, 250, 350, 450) zu kommunizieren, um den Roboterarm zu veranlassen, das Kalibriermuster (160, 260, 360, 460) zu den mehreren Orten zu bewegen, die an oder überall in dem imaginären Würfel verteilt sind,

Empfangen von mehreren Kalibrierbildern von der Kommunikationsschnittstelle (113), wobei die Kommunikationsschnittstelle (113) konfiguriert ist, die mehreren Kalibrierbilder von der Kamera (170, 180, 270, 370, 370A, 470) zu empfangen, und wobei die mehreren Kalibrierbilder durch die Kamera (170, 180, 270, 370, 370A, 470) erfasst werden und mehrere entsprechende Bilder der Kalibriermuster (160, 260, 360, 460) an den mehreren Orten sind,

Bestimmen entsprechender Abschätzungen von intrinsischen Kameraparametern basierend auf den mehreren Kalibrierbildern,

Bestimmen, basierend auf den entsprechenden Abschätzungen der intrinsischen Kameraparameter, einer Abschätzung einer Transformationsfunktion, die eine Beziehung zwischen einem Kamerakoordinatensystem und einem Weltkoordinatensystem beschreibt, wobei das Kamerakoordinatensystem ein Koordinatensystem ist, das in Bezug auf einen Ort und eine Ausrichtung der Kamera (170, 180, 270, 370, 370A, 470) definiert ist, mit der zu kommunizieren die Kommunikationsschnittstelle (113) konfiguriert ist, und das Weltkoordinatensystem ein Koordinatensystem ist, das in Bezug auf einen Ort definiert ist, der relativ zu der Basis des Roboters stationär ist, mit dem zu kommunizieren die Kommunikationsschnittstelle (113) konfiguriert ist;

Empfangen eines anschließenden Bildes von der Kommunikationsschnittstelle (113), wobei die Kommunikationsschnittstelle (113) konfiguriert ist, nach dem Bestimmen der entsprechenden Abschätzungen der intrinsischen Kameraparameter und der Abschätzung der Transformationsfunktion das anschließende Bild von der Kamera (170, 180, 270, 370, 370A, 470) zu empfangen; und

Steuern einer Platzierung des Roboterarms durch Ausgeben, an den Roboter (150, 250, 350, 450) über die Kommunikationsschnittstelle (113), eines anschließenden Bewegungsbefehls, der auf dem anschließenden Bild und der Abschätzung der Transformationsfunktion basiert.

17. Nicht flüchtiges computerlesbares Medium nach Anspruch 16, wobei die Befehle bei Ausführung durch die Steuerschaltung (111) ferner die Steuerschaltung (111) veranlassen, zu bestimmen, ob der Roboterarm das Kalibriermuster (160, 260, 360, 460) zu allen Eckorten des imaginären Würfels bewegen kann, wobei die Bewegungsbefehle zum Bewegen des Kalibriermusters (160, 260, 360, 460) zu den mehreren Orten als Reaktion auf eine Bestimmung ausgegeben werden, dass der Roboterarm das Kalibriermuster (160, 260, 360, 460) zu allen Eckorten des imaginären Würfels bewegen kann.

18. Nicht flüchtiges computerlesbares Medium nach Anspruch 17, wobei die Befehle bei Ausführung durch die Steuerschaltung (111) ferner die Steuerschaltung (111) veranlassen, zu bestimmen, ob der Roboterarm an jedem Eckort von allen Eckorten des imaginären Würfels das Kalibriermuster (160, 260, 360, 460) in einen Winkel neigen kann, der sich relativ zur Kamera (170, 180, 270, 370, 370A, 470) innerhalb eines definierten Winkelbereichs befindet, wobei die Bewegungsbefehle zum Bewegen des Kalibriermusters (160, 260, 360, 460) zu den mehreren Orten als Reaktion ausgegeben werden auf: (a) die Bestimmung, dass der Roboterarm das Kalibriermuster (160, 260, 360, 460) zu allen Eckorten des imaginären Würfels bewegen kann, und (b) eine Bestimmung, dass der Roboterarm an jedem Eckort von allen Eckorten des imaginären Würfels das Kalibriermuster (160, 260, 360, 460) in einen Winkel neigen kann, der sich relativ zur Kamera (170, 180, 270, 370, 370A, 470) innerhalb eines definierten Winkelbereichs befindet.

19. Nicht flüchtiges computerlesbares Medium nach Anspruch 18, wobei der imaginäre Würfel ein zweiter imaginärer Würfel ist, der durch die Steuerschaltung (111) bestimmt wird, und wobei die Befehle bei Ausführung durch die Steuerschaltung (111) die Steuerschaltung (111) ferner veranlassen zum Bestimmen eines ersten imaginären Würfels, der in das Kamerasichtfeld passt, Bestimmen, dass der Roboterarm das Kalibriermuster (160, 260, 360, 460) nicht zu einem oder mehreren Eckorten des ersten imaginären Würfels bewegen kann, oder dass der Roboterarm für einen oder mehrere Eckorte des ersten imaginären Würfels das Kalibriermuster (160, 260, 360, 460) nicht in einen Winkel neigen kann, der sich relativ zur Kamera (170, 180, 270, 370, 370A, 470) innerhalb des definierten Winkelbereichs befindet, wobei das Bestimmen aller Eckorte des zweiten imaginären Würfels nur als Reaktion auf mindestens eines erfolgt von: (a) einer Bestimmung, dass der Roboterarm das Kalibriermuster (160, 260, 360, 460) nicht zu einem oder mehreren Eckorten des ersten imaginären Würfels bewegen kann oder (b) der Roboterarm für einen oder mehrere Eckorte des ersten imaginären Würfels das Kalibriermuster (160, 260, 360, 460) nicht in einen Winkel neigen kann, der sich relativ zur Kamera (170, 180, 270, 370, 370A, 470) innerhalb des definierten Winkelbereichs befindet.

20. Nicht flüchtiges computerlesbares Medium nach Anspruch 19, wobei der erste imaginäre Würfel ein maximal dimensionierter imaginärer Würfel ist, der in das Kamerasichtfeld passen kann, und wobei der zweite imaginäre Würfel kleiner ist als der erste imaginäre Würfel.

Es folgen 23 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

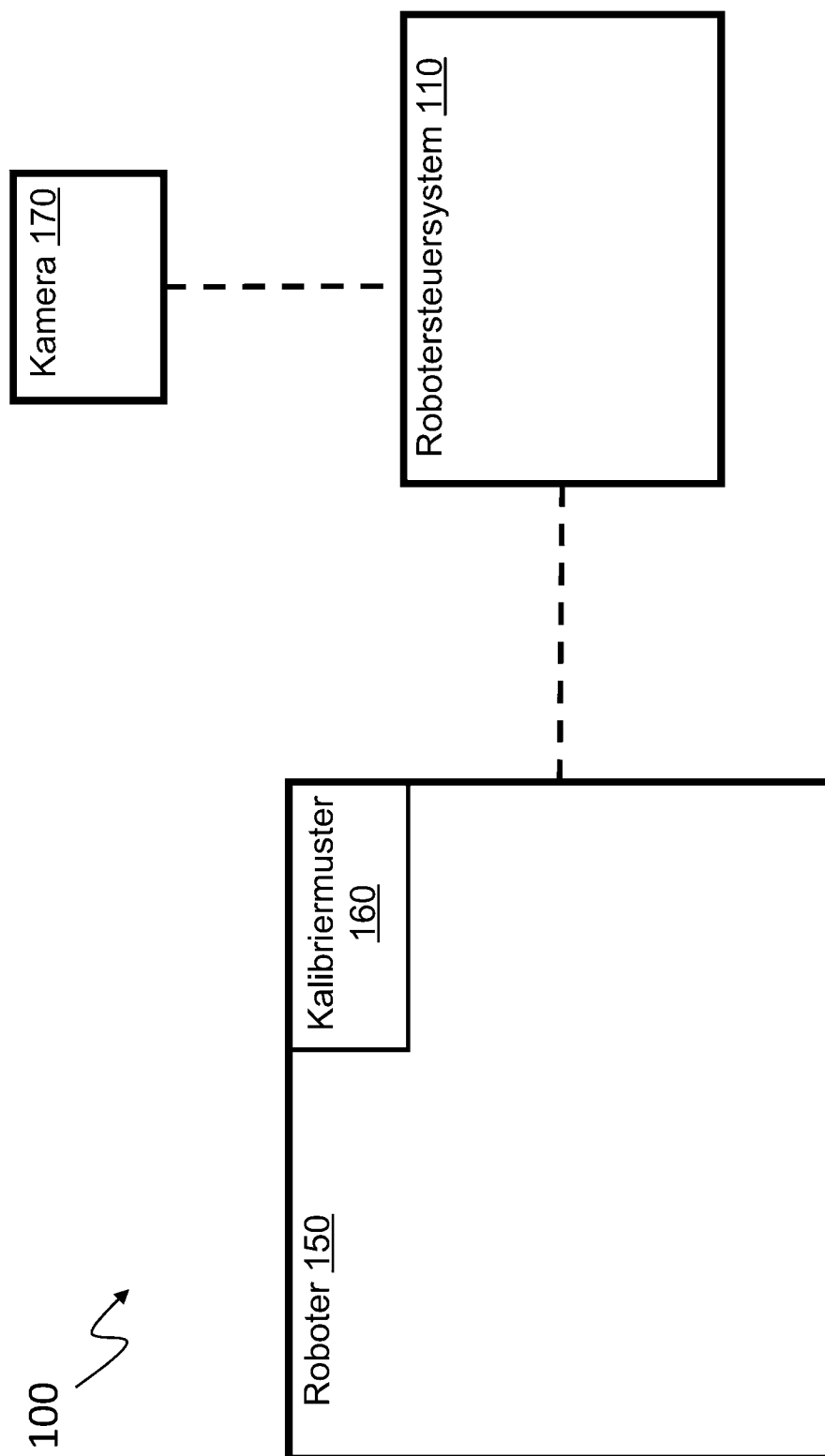
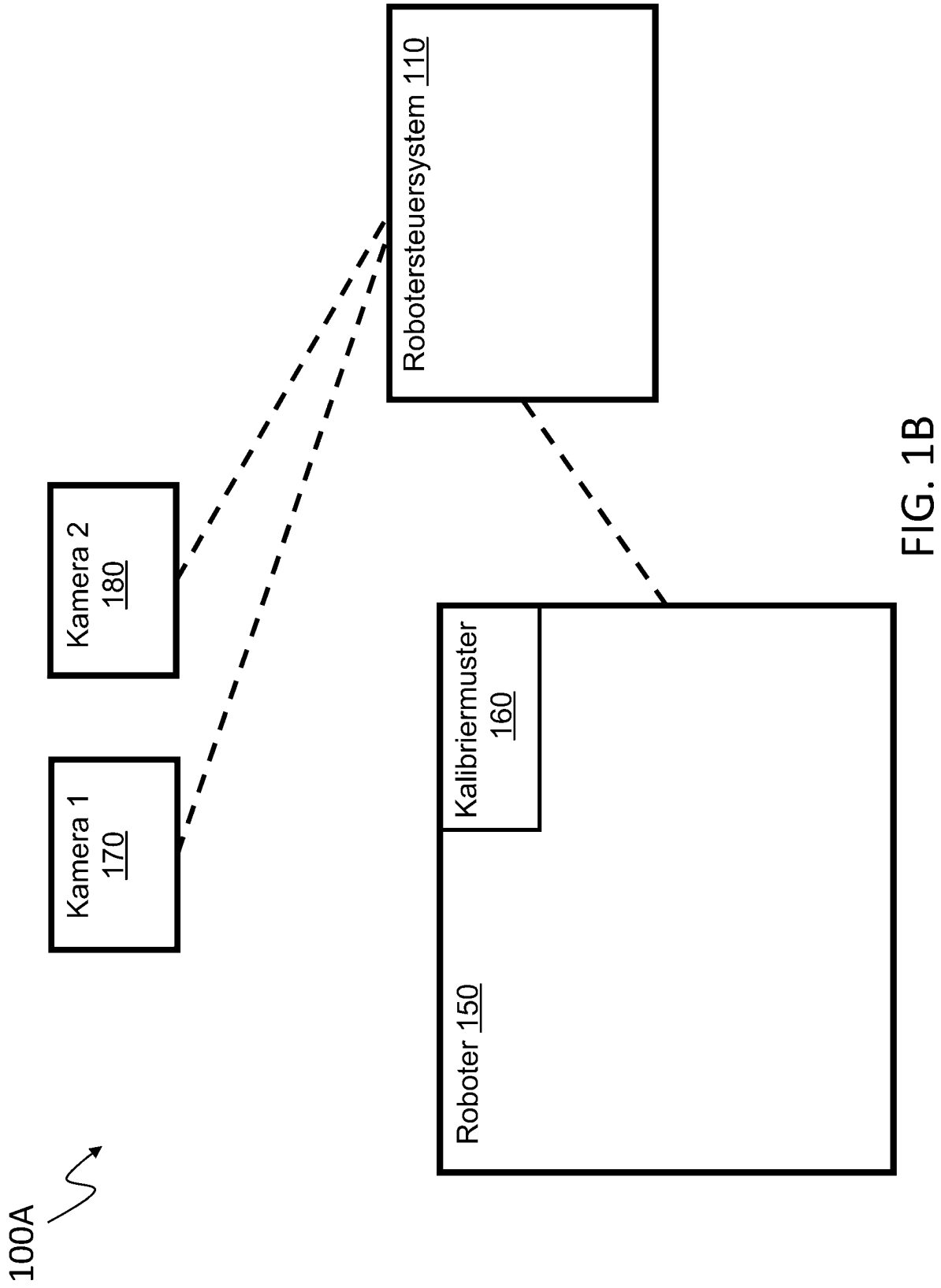


FIG. 1A



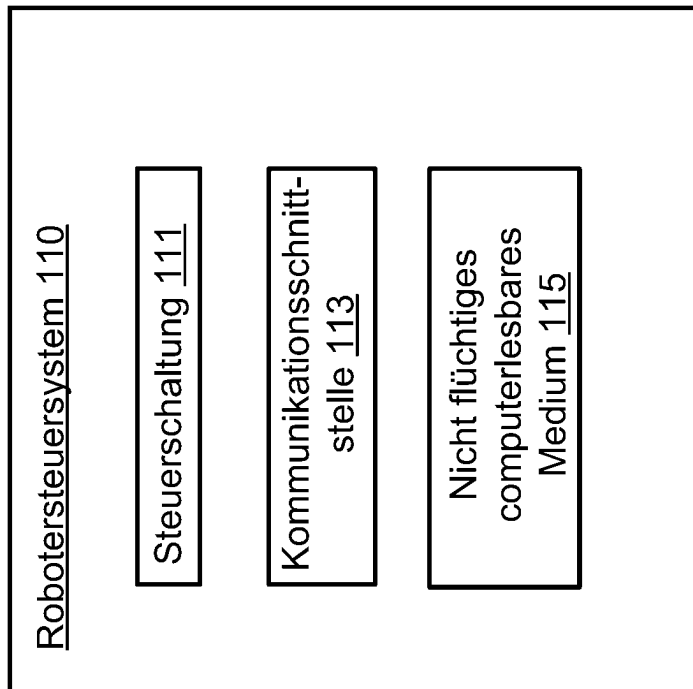


FIG. 1C

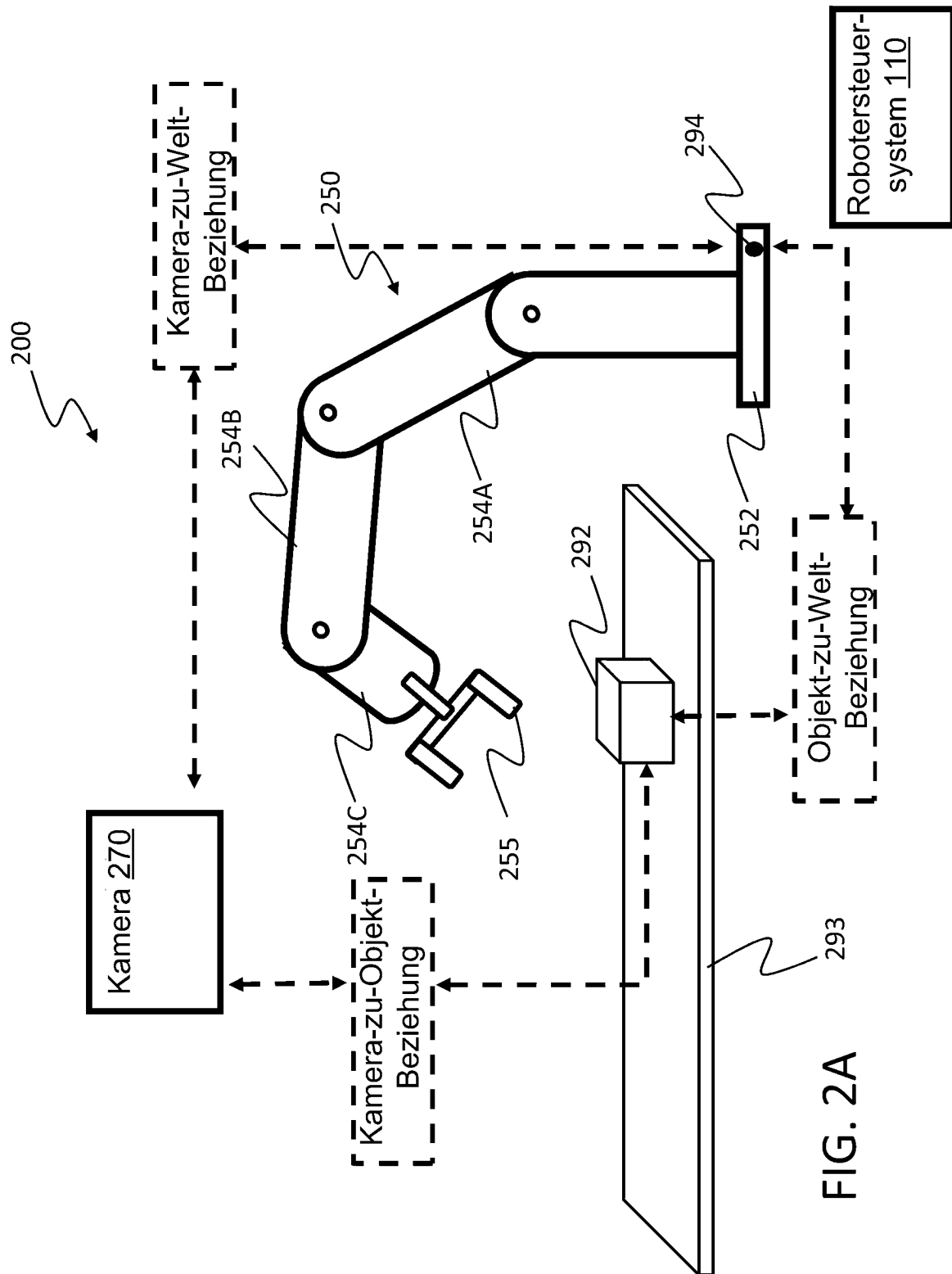


FIG. 2A

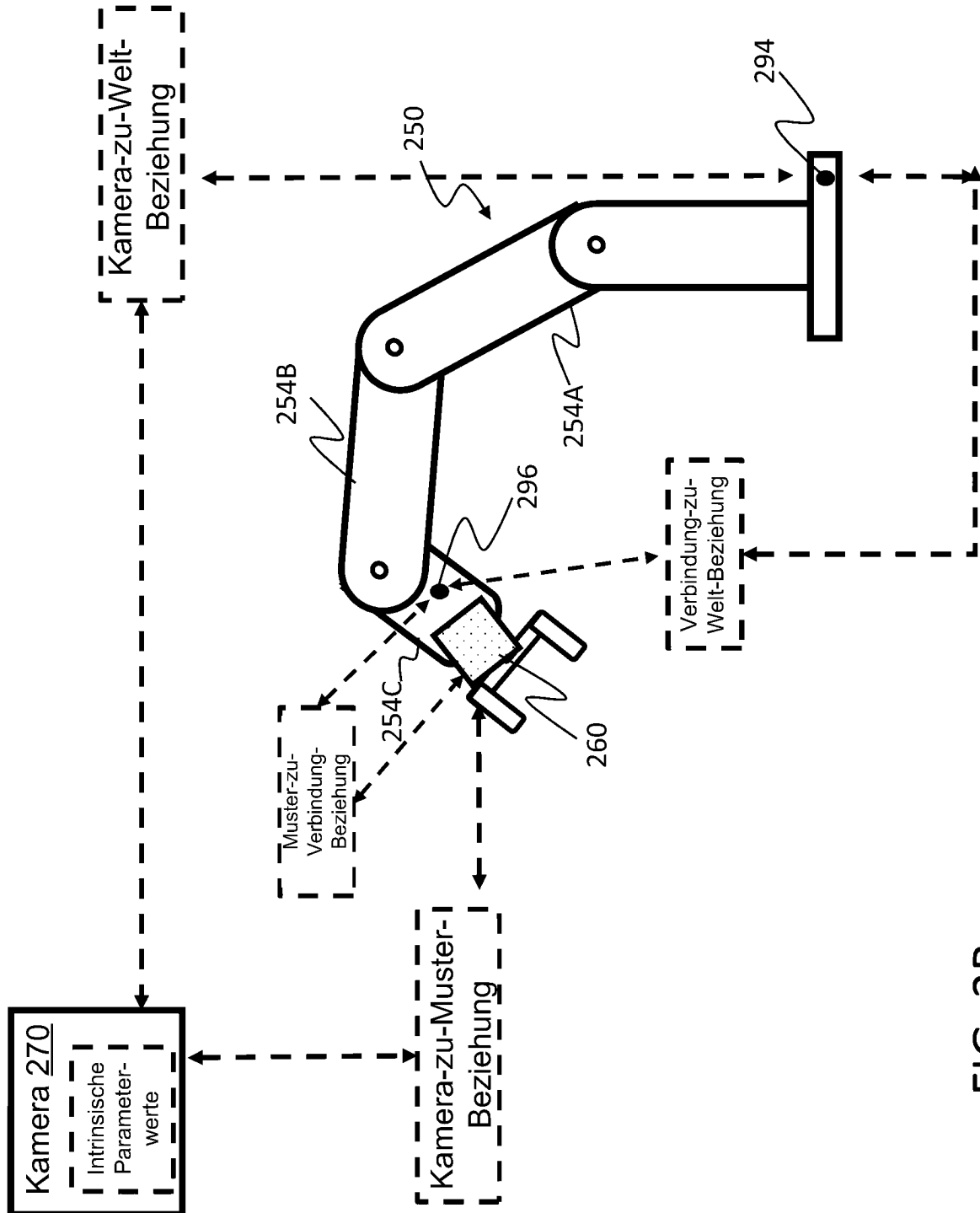


FIG. 2B

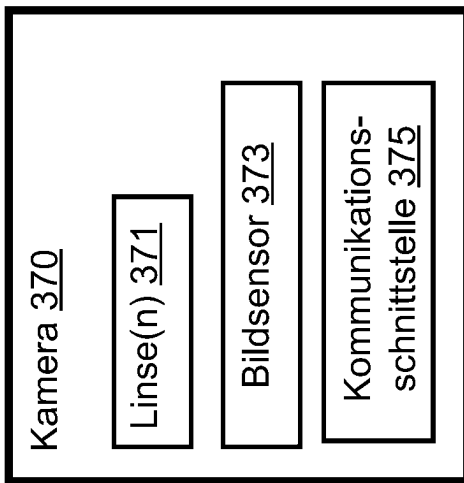


FIG. 3A

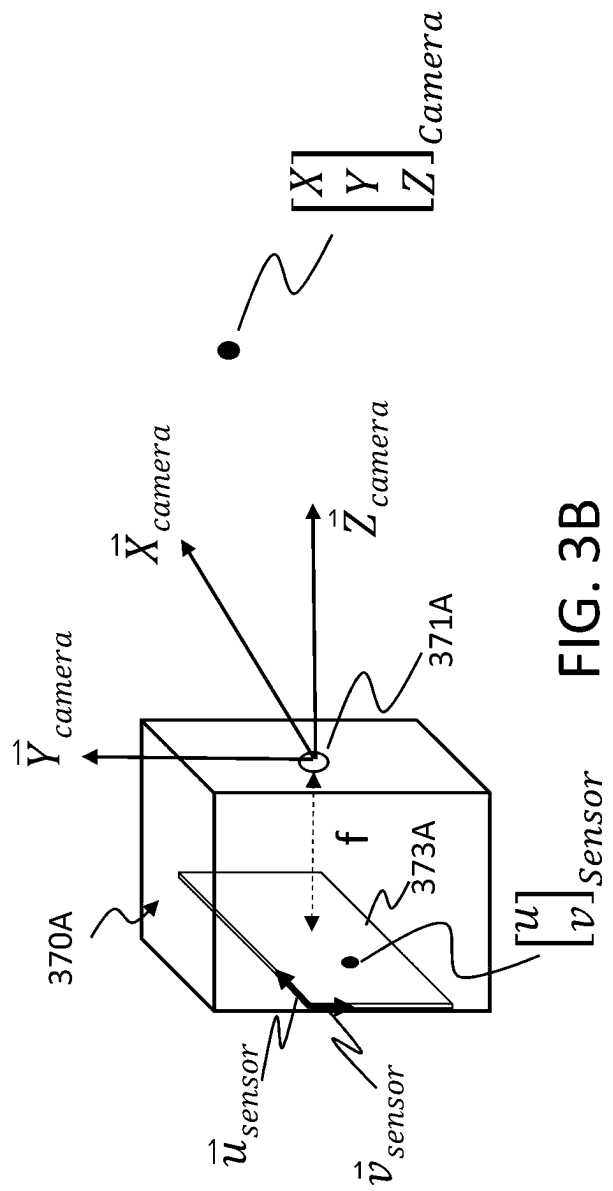


FIG. 3B

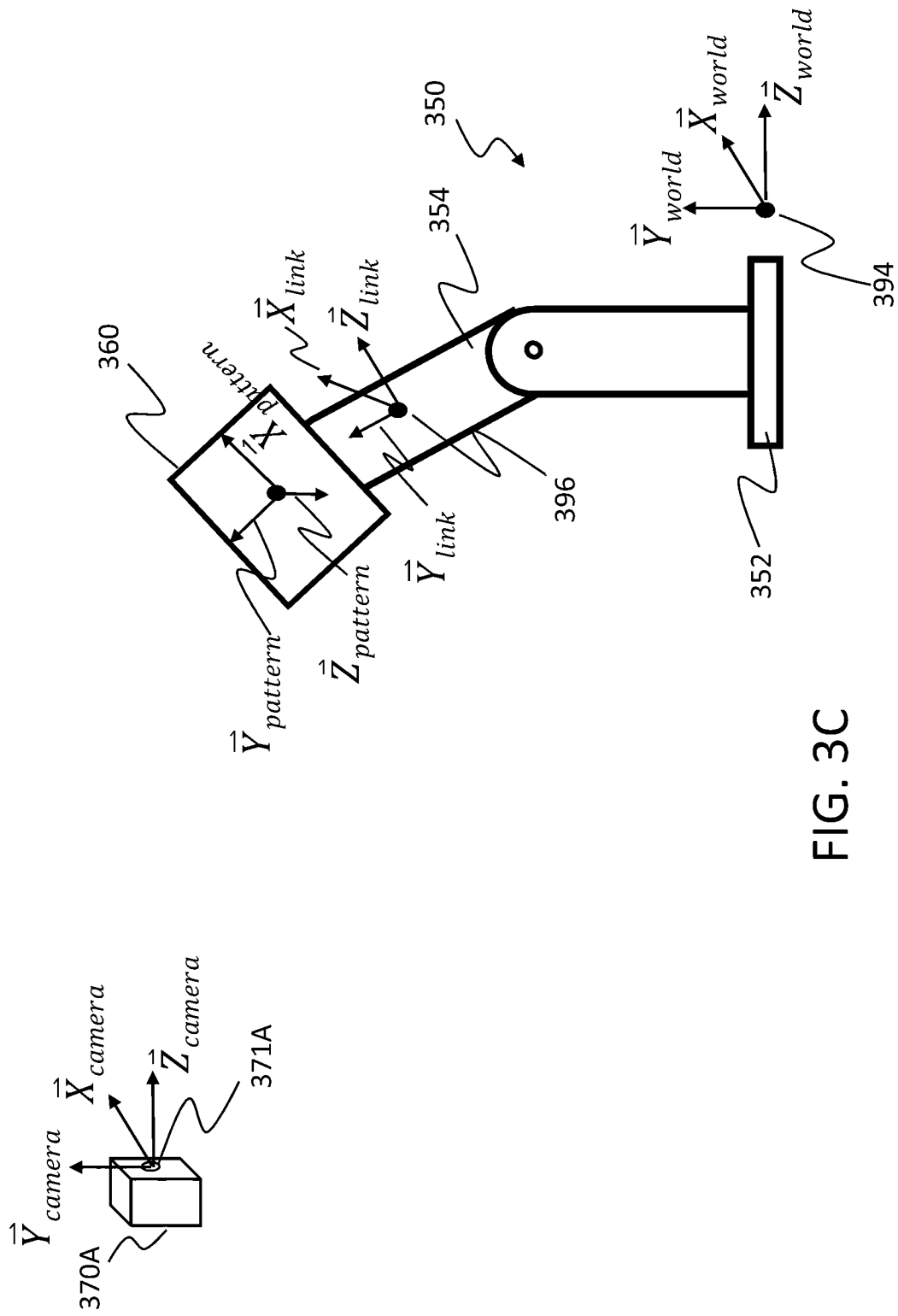


FIG. 3C

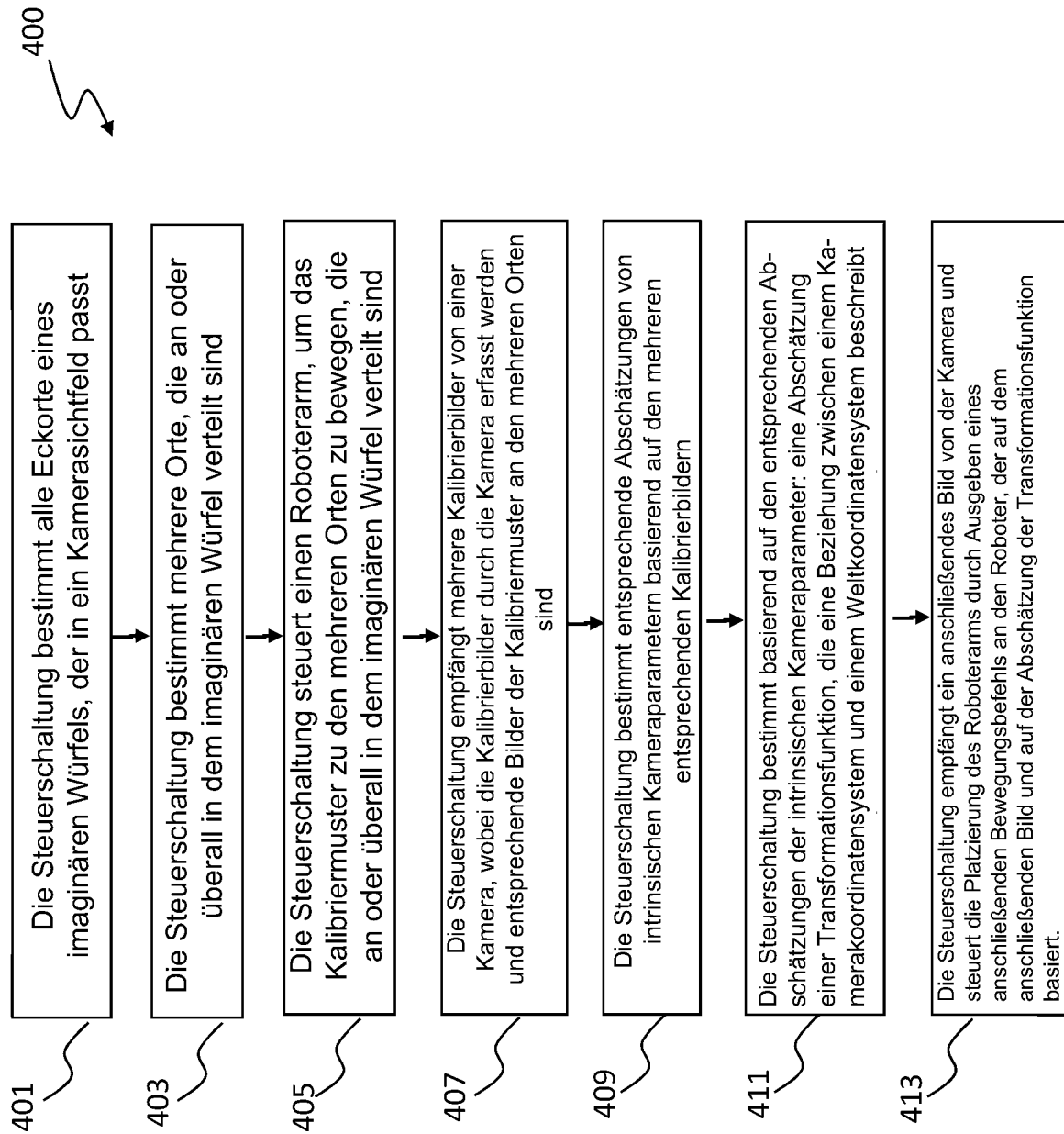


FIG. 4

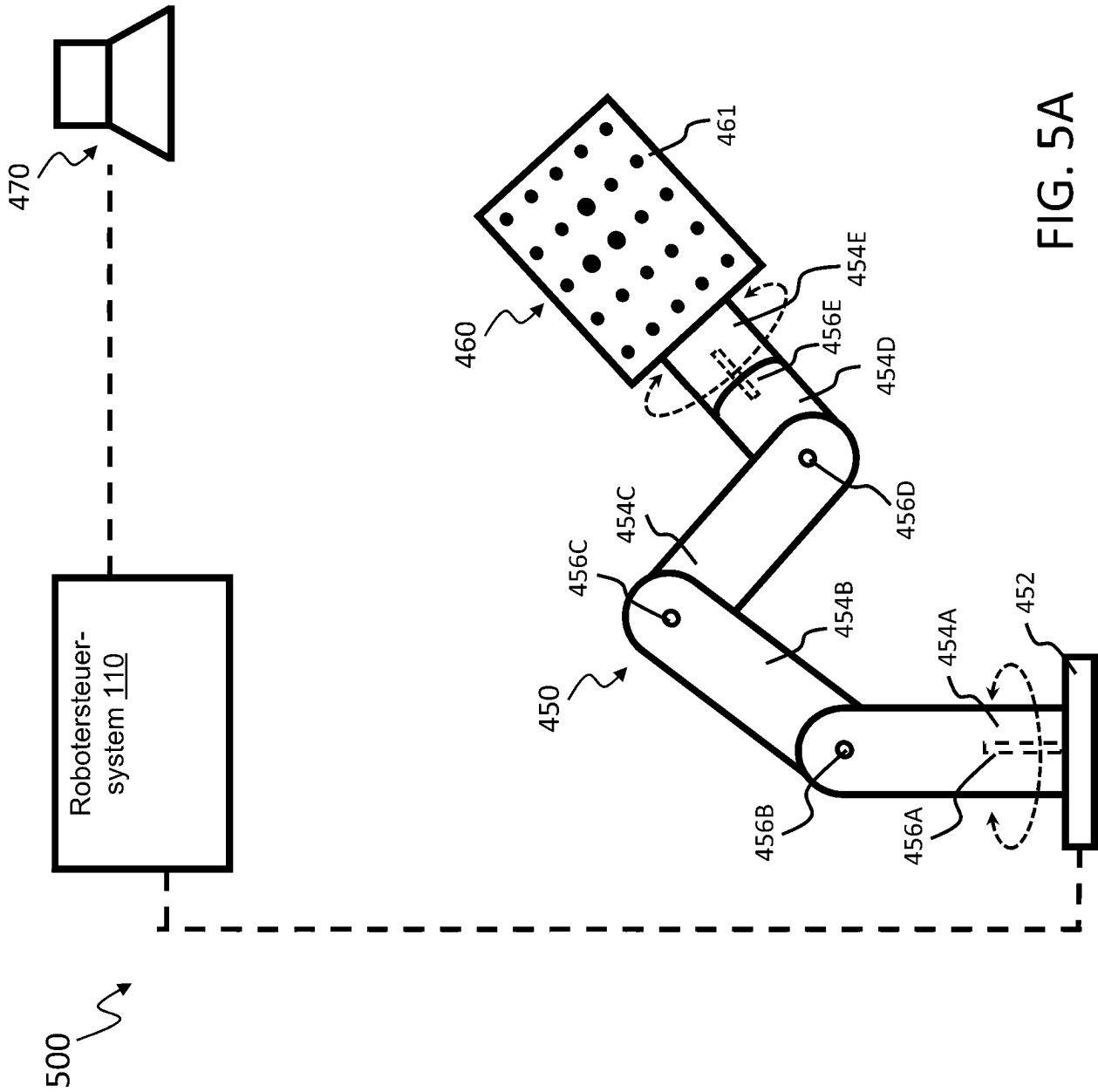
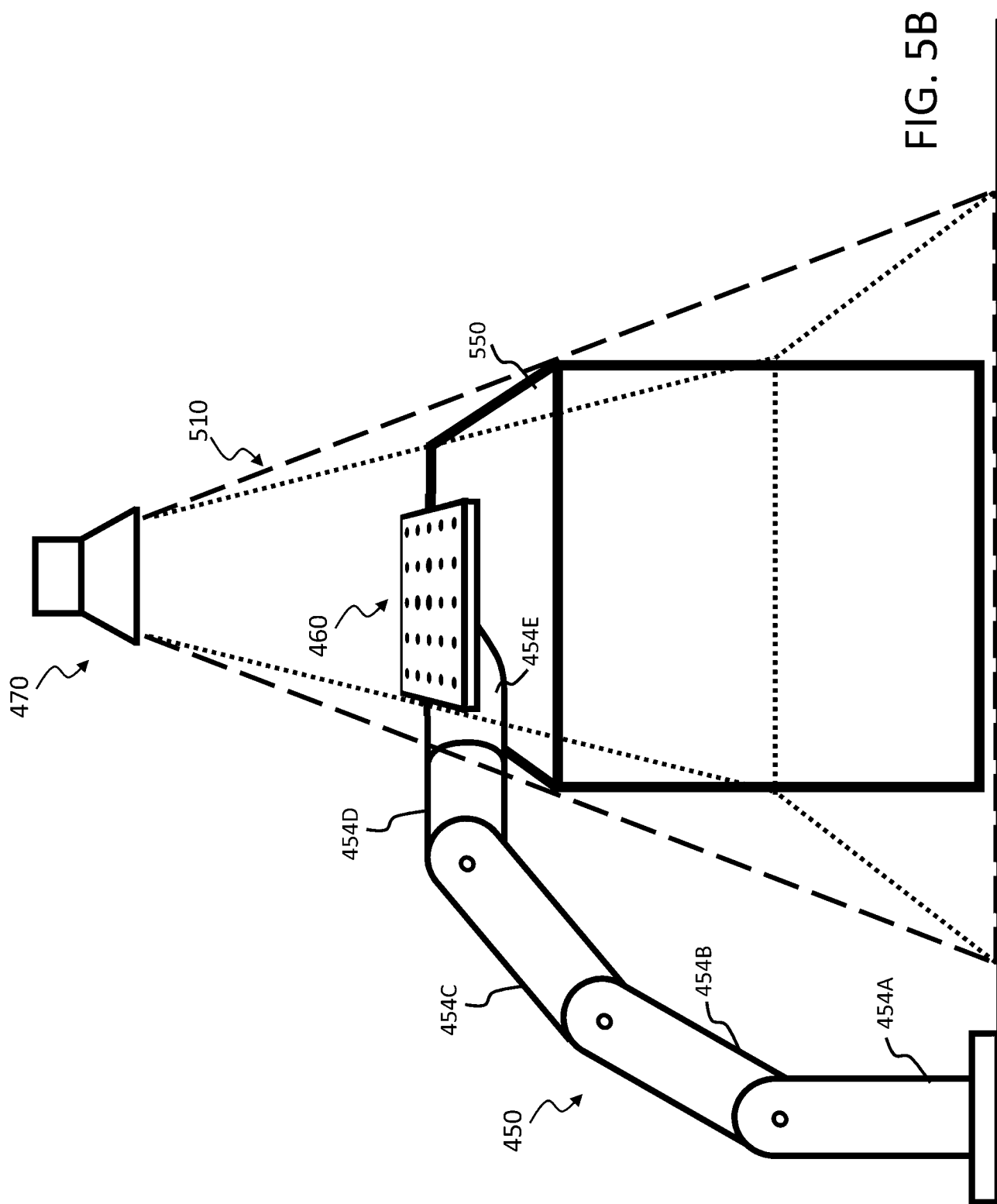


FIG. 5A



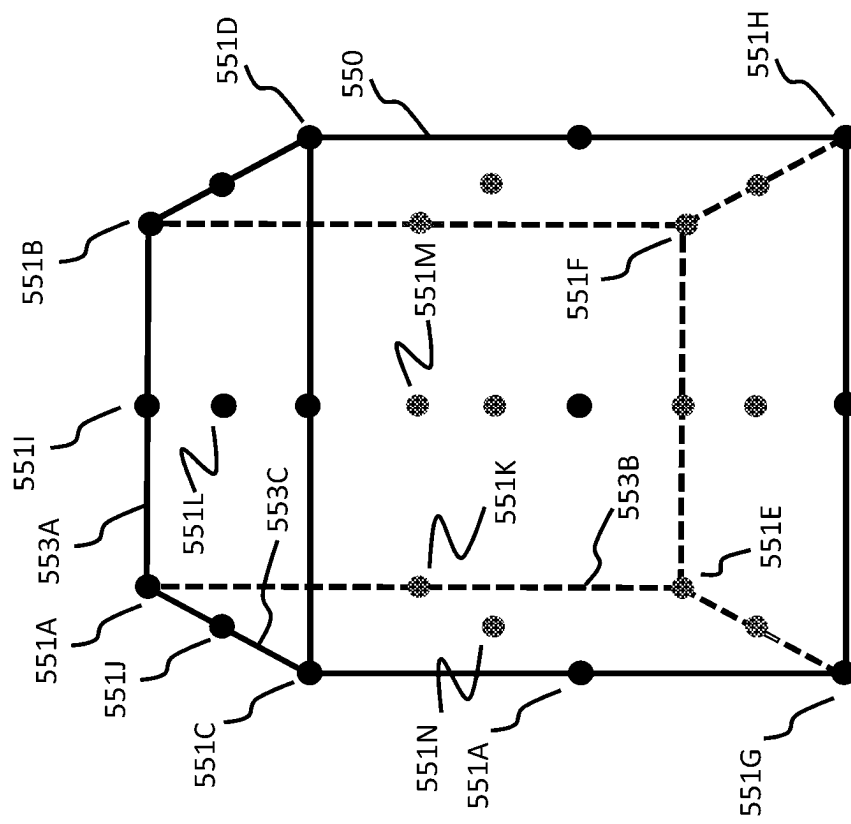


FIG. 5C

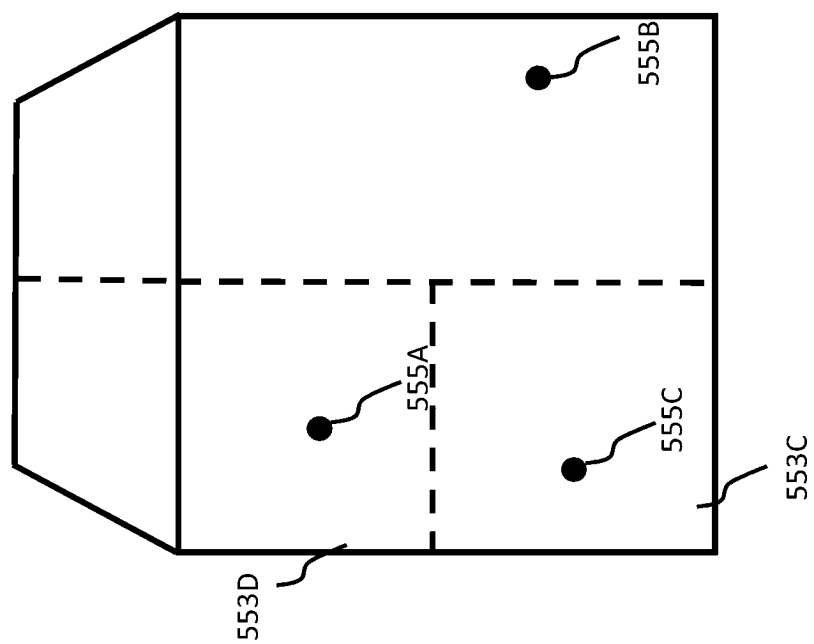


FIG. 5D

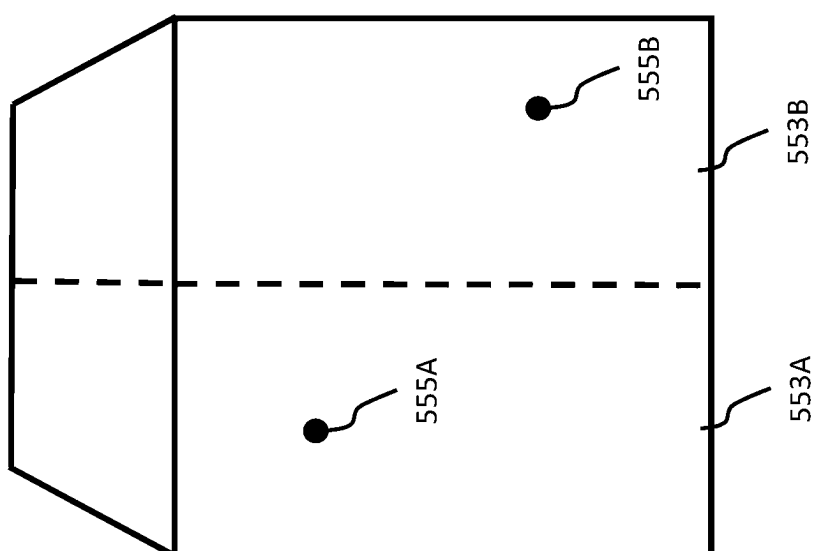


FIG. 5E

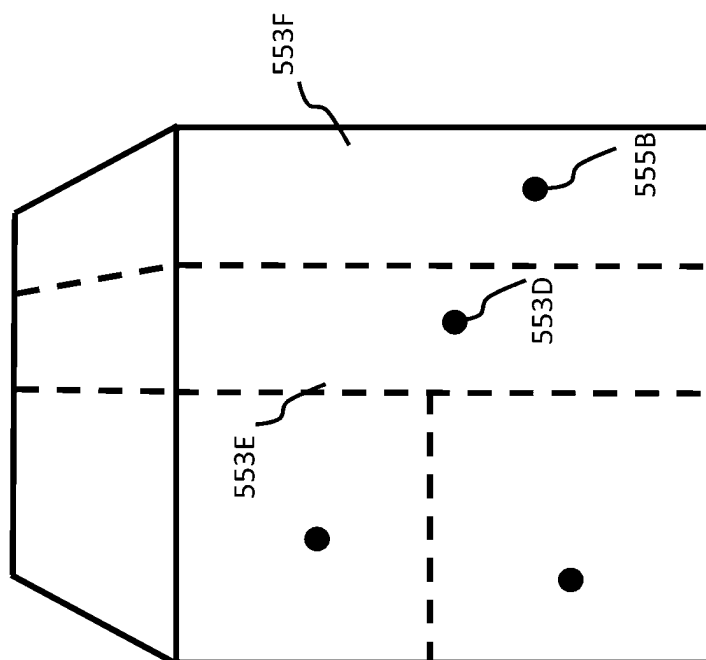


FIG. 5F

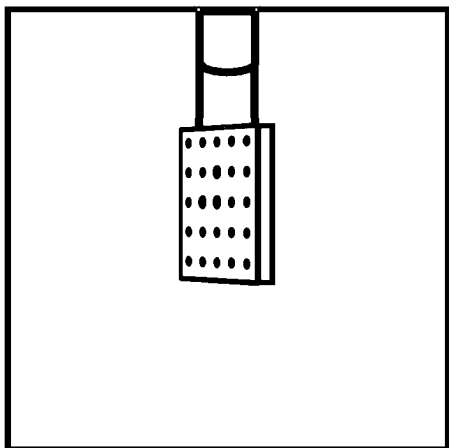


FIG. 6B

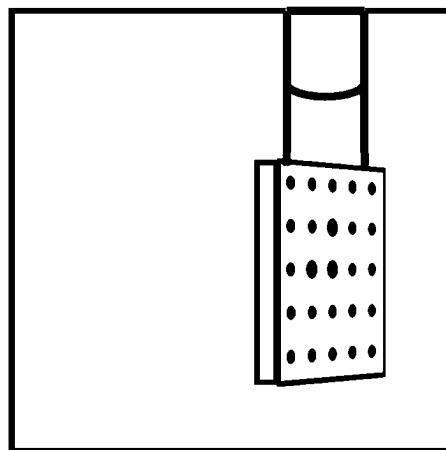


FIG. 6D

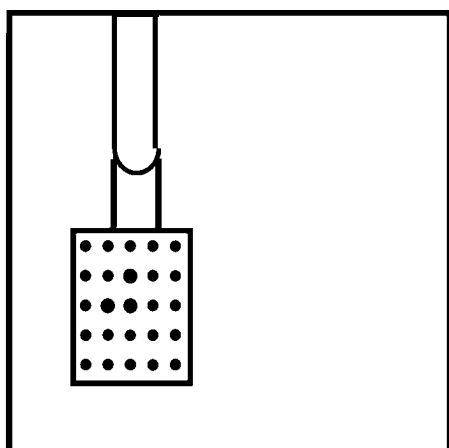


FIG. 6A

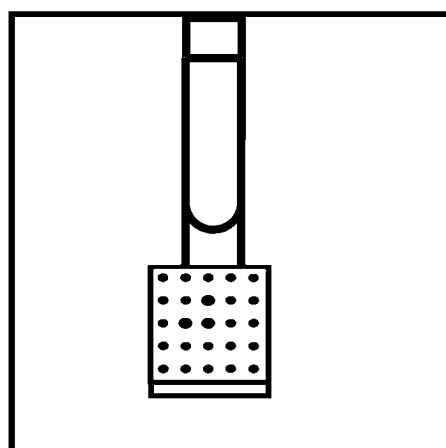
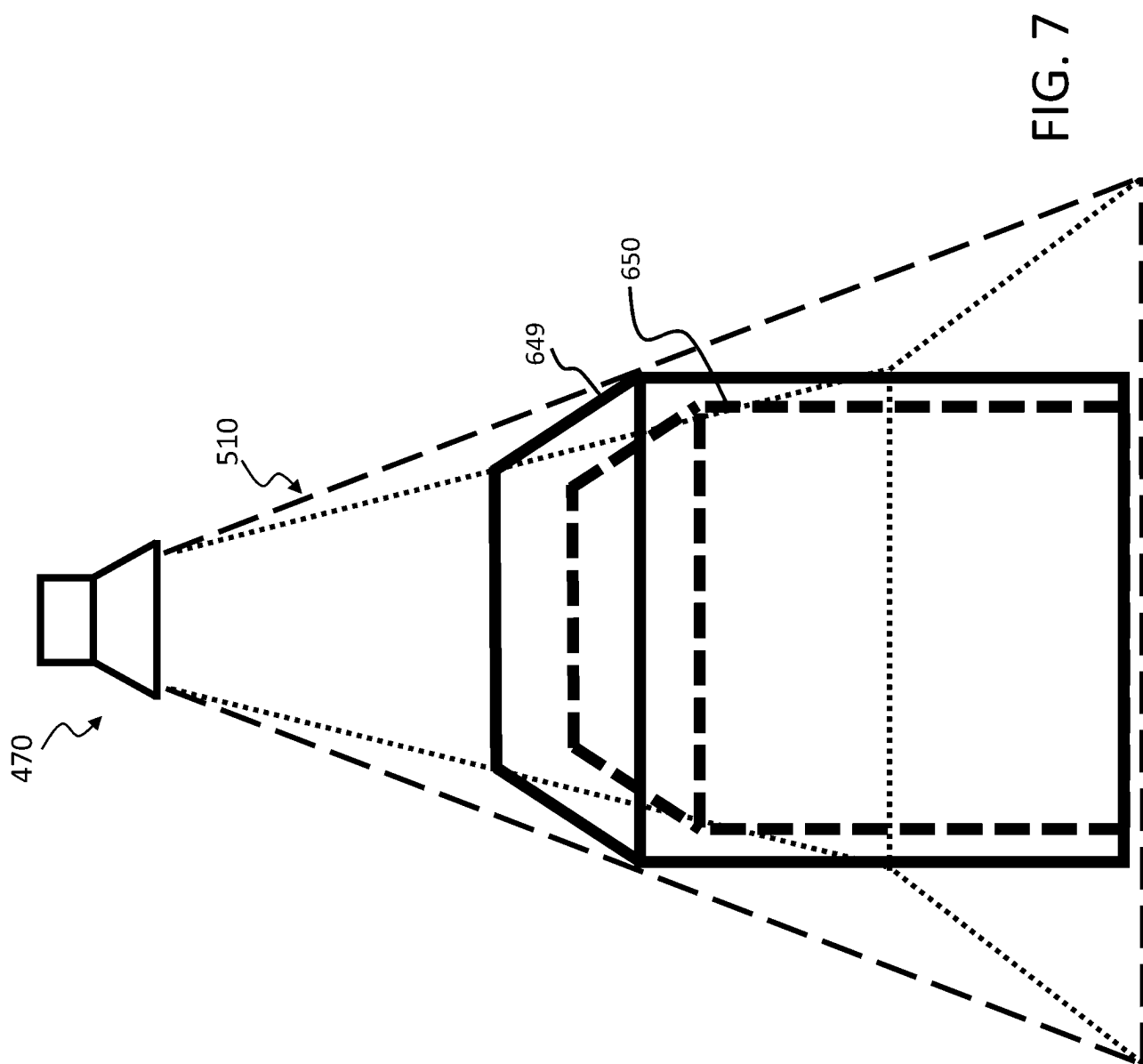


FIG. 6C



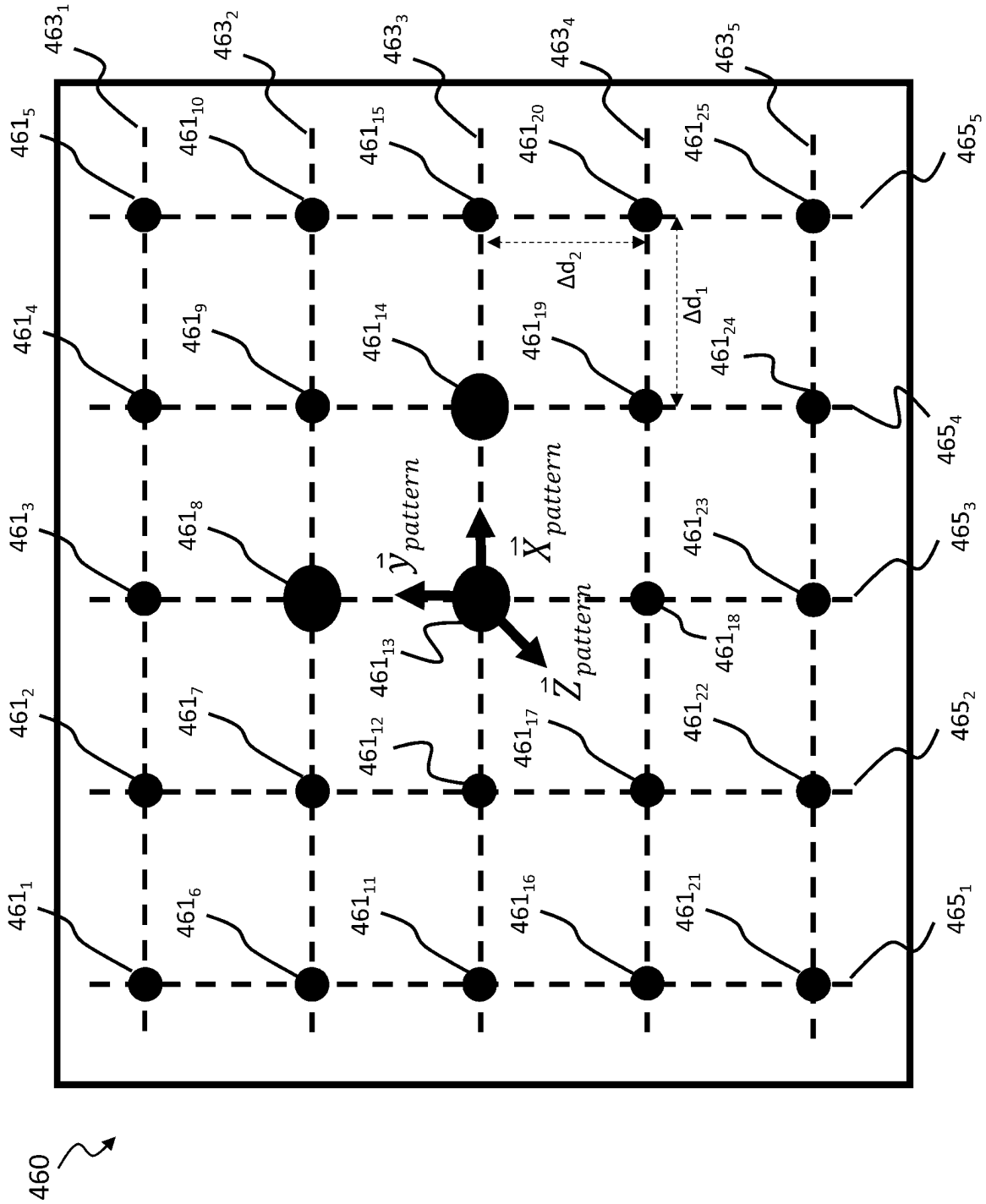


FIG. 8A

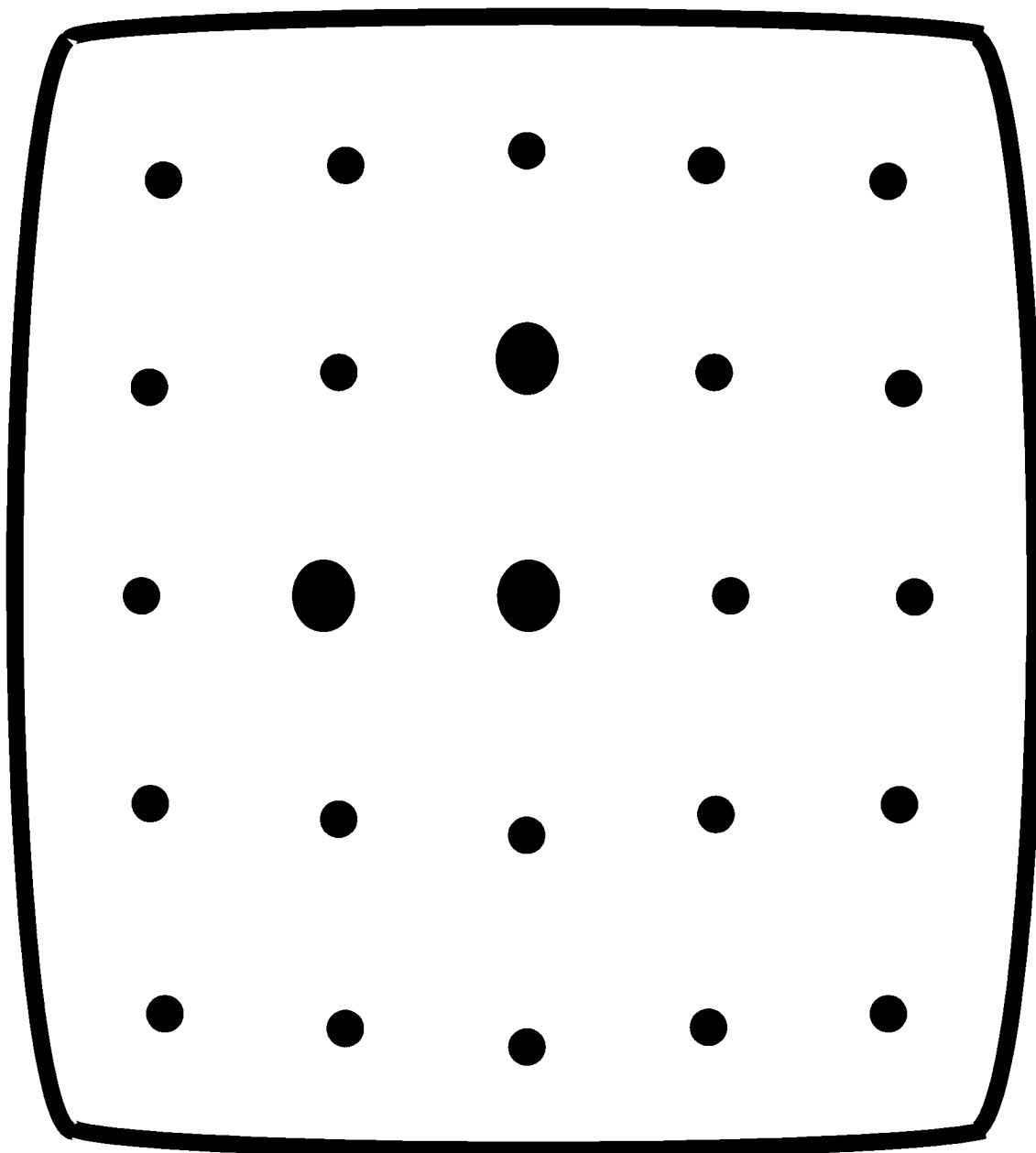


FIG. 8B

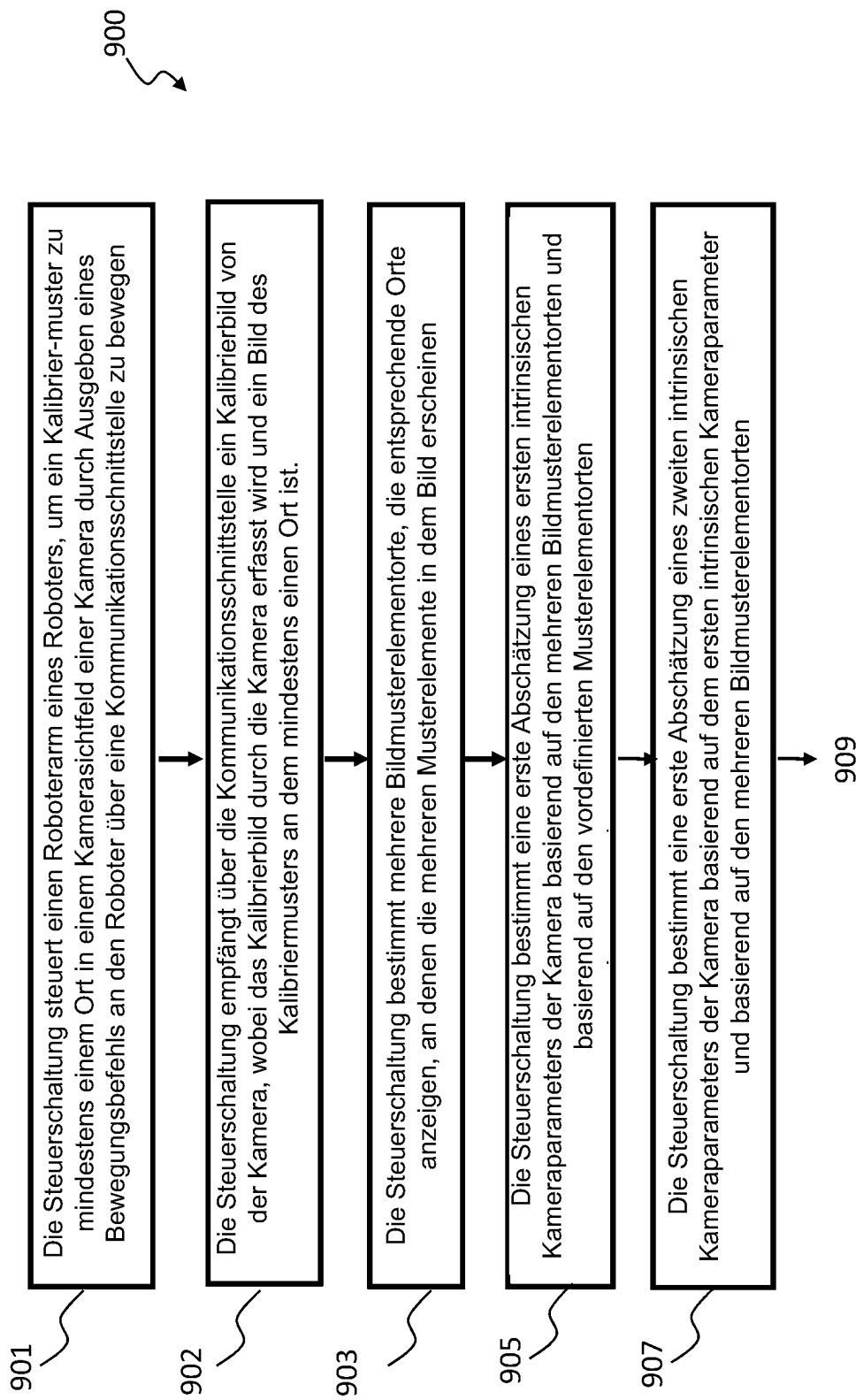


FIG. 9A

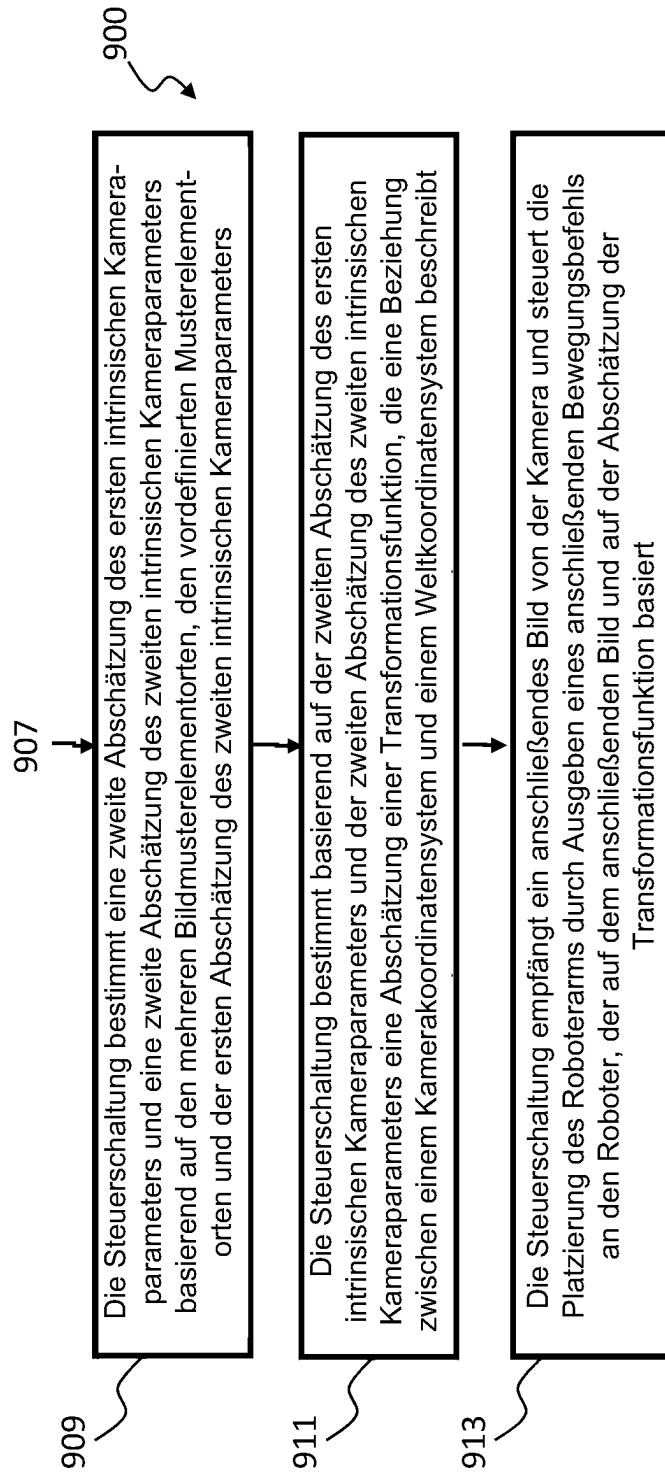


FIG. 9B

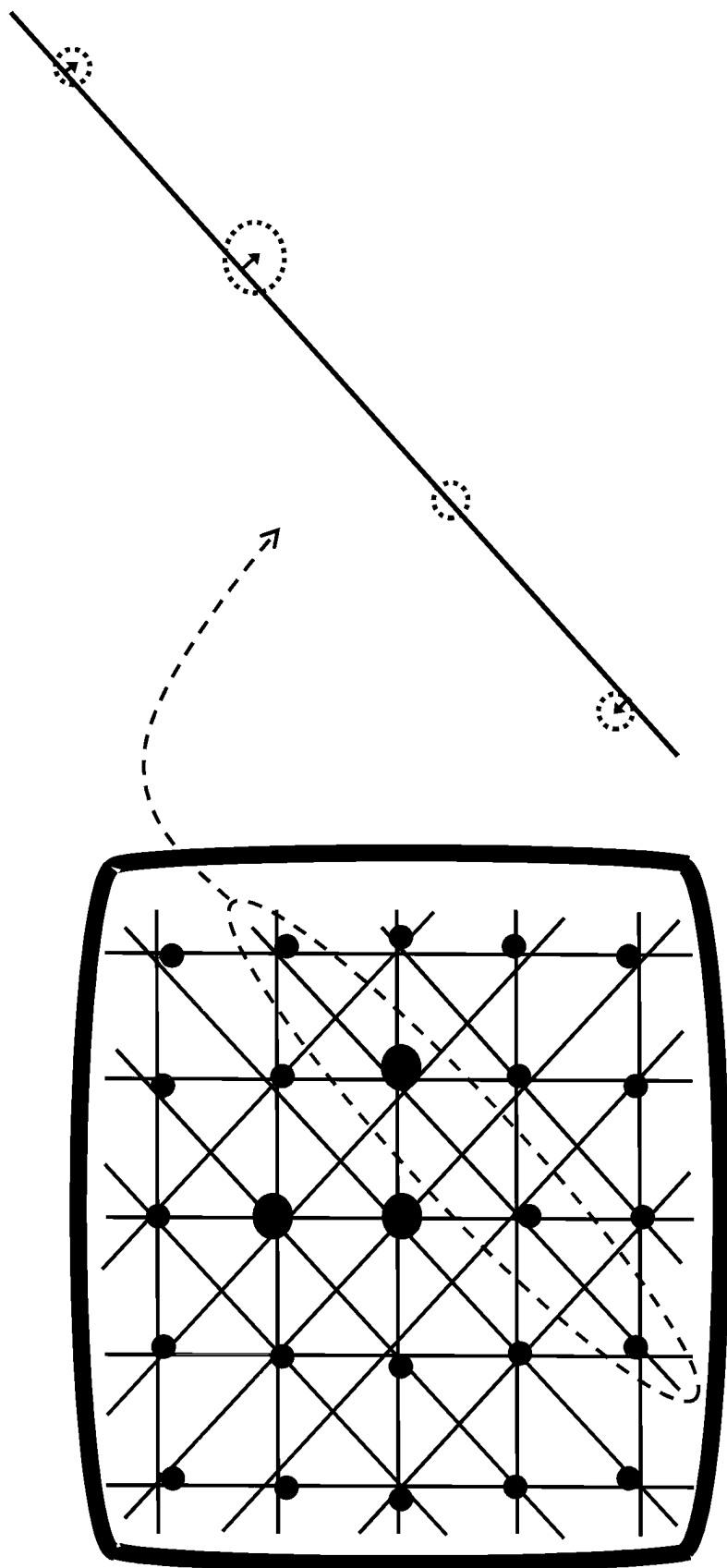


FIG. 10B

FIG. 10A

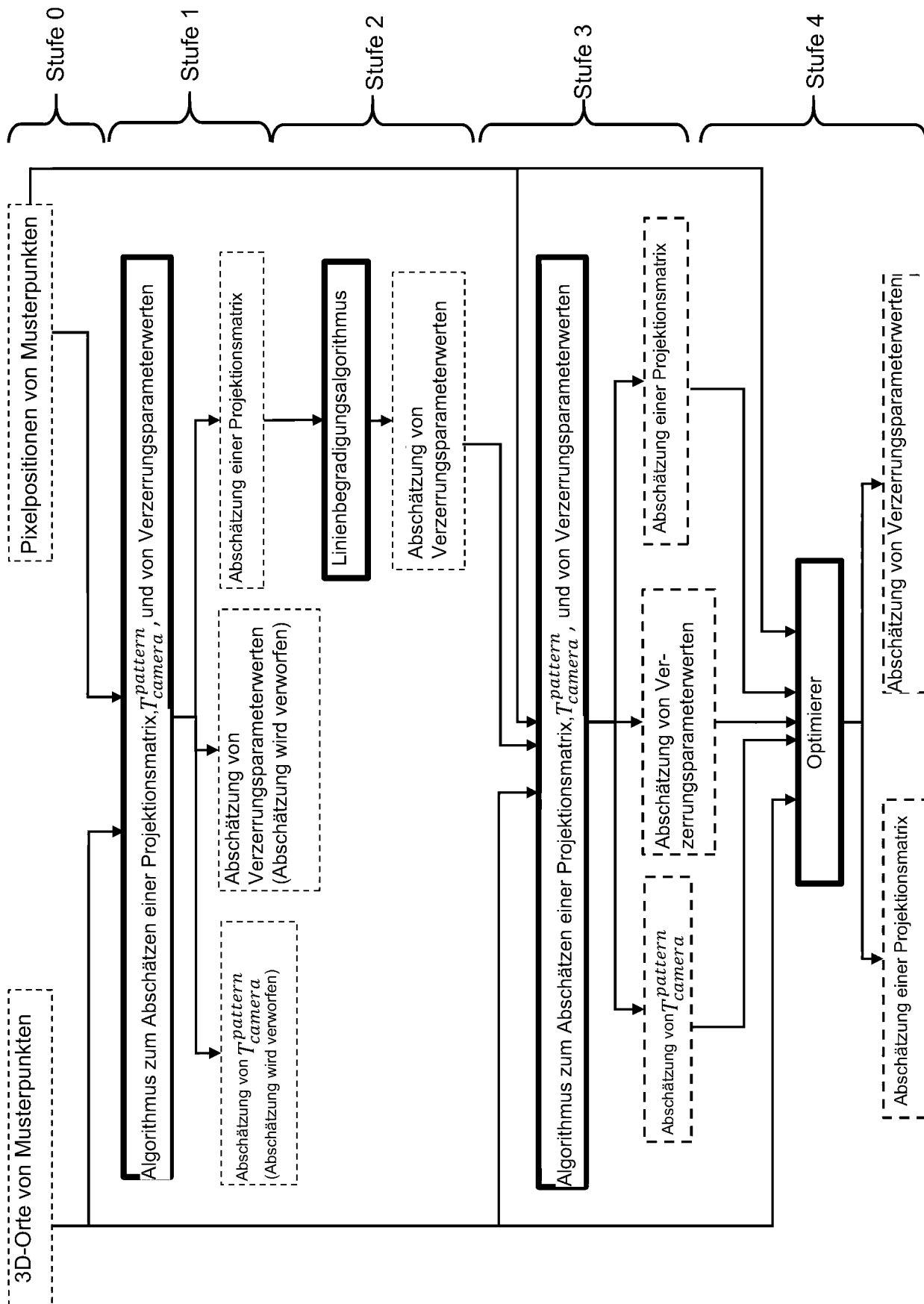


FIG. 11A

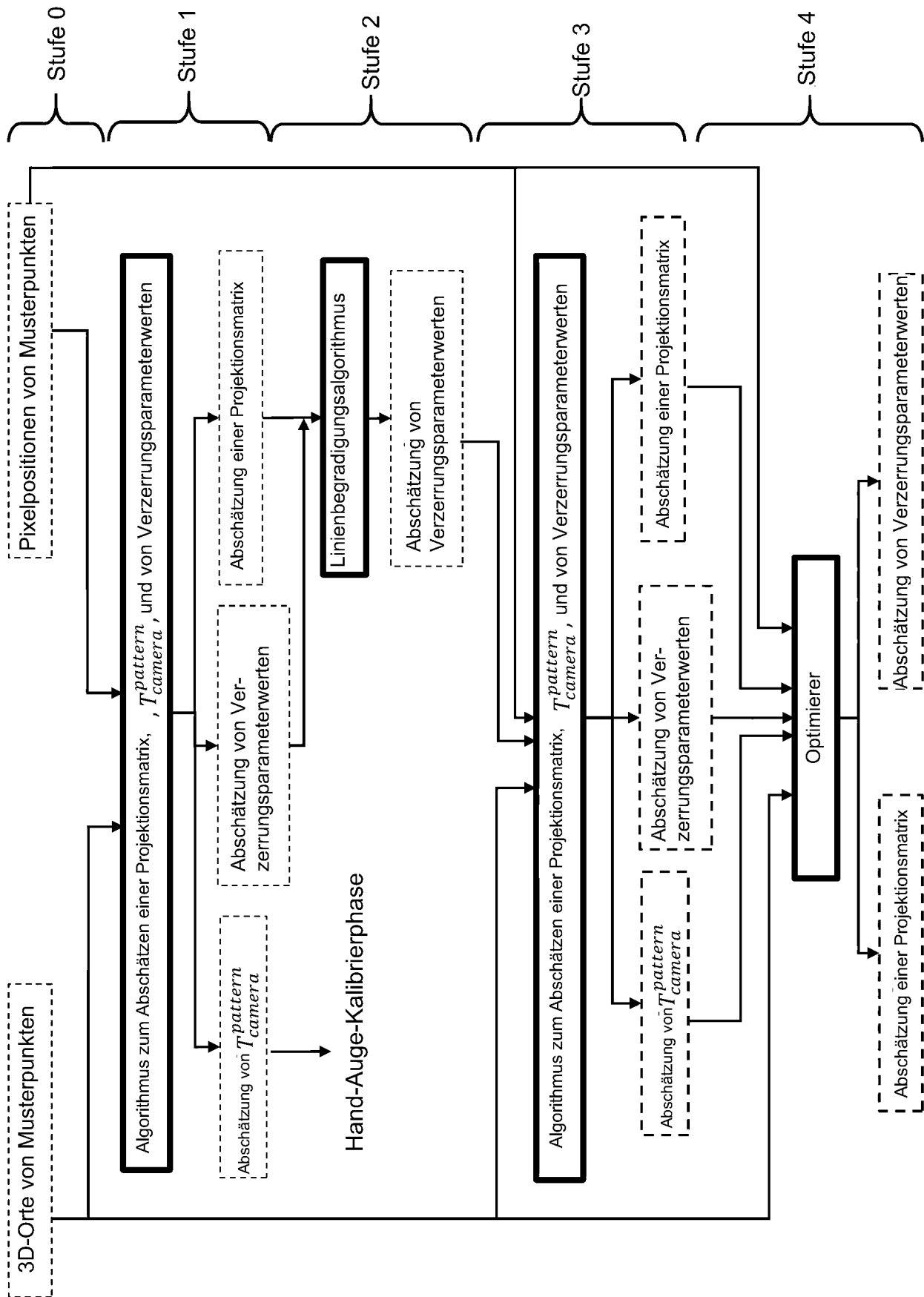


FIG. 11B

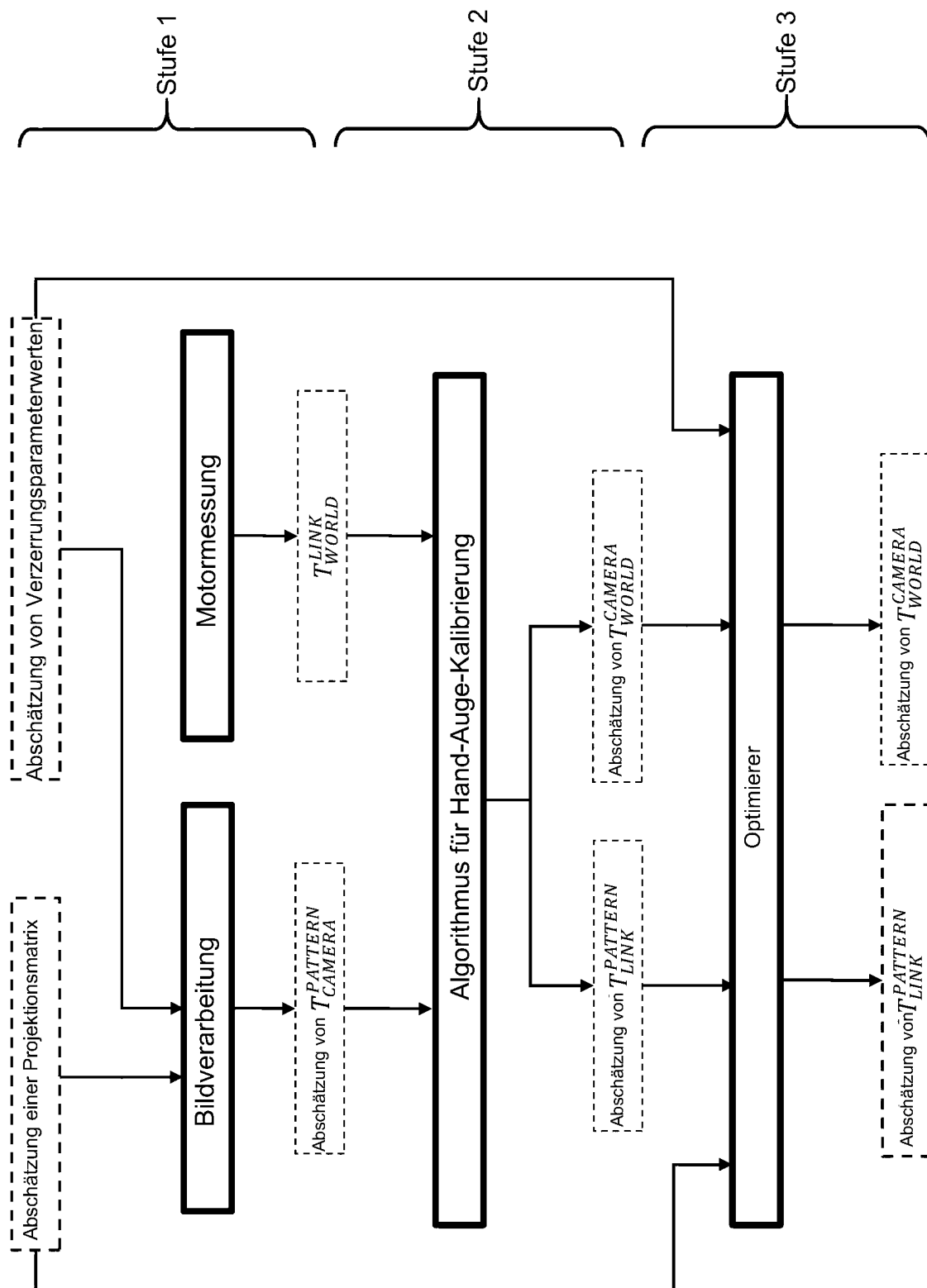


FIG. 12