



(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2017 109 039.8**  
(22) Anmeldetag: **27.04.2017**  
(43) Offenlegungstag: **31.10.2018**

(51) Int Cl.: **G01C 25/00** (2006.01)  
**G01C 3/08** (2006.01)  
**G01C 11/04** (2006.01)  
**G01B 11/24** (2006.01)

(71) Anmelder:  
**SICK AG, 79183 Waldkirch, DE**

(72) Erfinder:  
**Beinschob, Patric, Dr., 22043 Hamburg, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

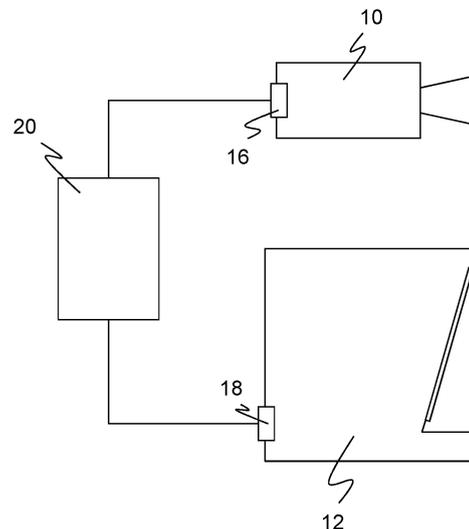
<b>DE</b>	<b>10 2004 033 114</b>	<b>A1</b>
<b>DE</b>	<b>10 2011 056 948</b>	<b>A1</b>
<b>DE</b>	<b>10 2015 118 874</b>	<b>A1</b>
<b>US</b>	<b>2016 / 0 070 981</b>	<b>A1</b>

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.**

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur Kalibrierung einer Kamera und eines Laserscanners**

(57) Zusammenfassung: Es wird ein Verfahren zur Kalibrierung einer Kamera (10) und eines Laserscanners (12) für deren Sensorfusion angegeben, bei dem die Kamera (10) ein Kamerabild einer Szenerie (14) aufnimmt und der Laserscanner (12) die Szenerie (14) zumindest teilweise mit einem Abtaststrahl abtastet und aus der jeweiligen Winkelposition des Abtaststrahls und der in der Winkelposition bestimmten Intensität des aus der Szenerie (14) remittierten Abtaststrahls ein Remissionsbild aufzeichnet, wobei aus einem Vergleich von Kamerabild und Remissionsbild ein Versatz und/oder eine relative Orientierung zwischen Kamera (10) und Laserscanner (12) bestimmt wird. Dabei werden mit dem Laserscanner (12) zu dem Remissionsbild auch Entfernungen bestimmt und zu dem Kamerabild Entfernungen rekonstruiert, und für den Vergleich wird eine Korrespondenzsuche von in dem Kamerabild und in dem Remissionsbild übereinstimmenden Merkmalen im dreidimensionalen Raum durchgeführt.



## Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Kalibrierung einer Kamera und eines Laserscanners nach dem Oberbegriff von Anspruch 1 sowie ein entsprechendes System gemäß Anspruch 14.

**[0002]** In einem Laserscanner tastet ein Abtast- oder Scanstrahl einen Bereich ab und wertet das remittierte oder reflektierte Licht aus. Um auch Informationen über Objektabstände, Konturen oder Profile zu gewinnen, wird meist nicht nur die Anwesenheit von Objekten, sondern zugleich auch deren Entfernung bestimmt. Derartige entfernungsmessende Laserscanner arbeiten nach einem Lichtlaufzeitprinzip, bei dem die Laufzeit vom Scanner in die Szenerie und zurück gemessen wird und anhand der Lichtgeschwindigkeit Entfernungsdaten berechnet werden. Zwei Arten des Lichtlaufzeitverfahrens sind weit verbreitet. Bei phasenbasierten Verfahren moduliert der Lichtsender den Scanstrahl, und es wird die Phase zwischen einer Referenz und dem empfangenen Scanstrahl ermittelt. Pulsbasierte Verfahren prägen dem Scanstrahl ein signifikantes Muster auf, beispielsweise einen schmalen Puls von nur wenigen Nanosekunden Dauer, und bestimmen den Empfangszeitpunkt dieses Musters. In einer als Pulsmittelungsverfahren bezeichneten Verallgemeinerung werden mehrere Pulse oder eine Pulsfolge ausgesandt und die empfangenen Pulse statistisch ausgewertet.

**[0003]** Bekannte Laserscanner weisen einen Drehspiegel oder ein Polygonspiegelrad auf, um periodisch eine Überwachungsebene oder ein Segment einer Überwachungsebene abzutasten. Alternativ rotiert ein aktiver Messkopf mit Lichtsender und Lichtempfänger. 3D-Laserscanner erfassen einen dreidimensionalen Raumbereich und nicht lediglich eine Fläche. Das kann durch Bewegung um eine weitere Achse realisiert werden, sei es in einer Schwenk- oder einer vollständigen Drehbewegung. In der DE 10 2008 032 216 A1 beispielsweise wird die gesamte Scaneinheit samt Sender, Empfänger und Drehspiegel auf einem Ablenkteller angeordnet. Die EP 1 965 225 A2 offenbart verschiedenste Möglichkeiten, die Drehbewegung eines Laserscanners mit einer zusätzlichen Kippbewegung zu kombinieren.

**[0004]** Kamera und Laserscanner sind Sensoren, die einander sehr gut ergänzen. Während der Laserscanner genutzt wird, um die Geometrie einer Szene abzutasten, kann die Kamera den visuellen Eindruck der Szene und damit Eigenschaften wie Beleuchtung, Materialien oder Texturen erfassen. Oftmals ist es wünschenswert, beide Sensordatenquellen zu kombinieren beziehungsweise zu fusionieren, um so die Umgebung naturgetreu zu digitalisieren. Dadurch können optischer Eindruck und Geometrie auf Computern reproduziert werden, um beispiels-

weise Planungsaufgaben nicht mehr vor Ort durchführen zu müssen.

**[0005]** Für eine korrekte Sensorfusion muss die sogenannte Extrinsik bekannt sein, also die Transformation zwischen dem optischen Zentrum des Laserscanners und der Kamera. Diese Transformation umfasst im Allgemeinen die Translation in drei Raumdimensionen und die drei Drehwinkel im Raum und hat daher sechs Freiheitsgrade. Die Bestimmung der Transformation wird extrinsische Kalibrierung genannt. Man kann dies auch als Bestimmung der Umrechnungsvorschrift zwischen den jeweiligen lokalen Koordinatensystemen beziehungsweise in ein globales Koordinatensystem beschreiben, wofür auch der Begriff Registrierung üblich ist.

**[0006]** Die akademische Literatur zu extrinsischer Kalibrierung beschreibt Techniken, die von einem definiertem Kalibrierobjekt ausgehen beziehungsweise das Objekt aus mehreren Perspektiven erfassen müssen, um die Transformation zu schätzen.

**[0007]** In der Arbeit Pandey, Gaurav, et al. „Extrinsic calibration of a 3d laser scanner and an omnidirectional camera.“ IFAC Proceedings Volumes 43.16 (2010): 336-341 wird ein genau definiertes Schachbrett benutzt, das von verschiedenen Perspektiven gesehen werden muss. Nach dem Artikel Park, Yoonsu, et al. „Calibration between color camera and 3D LIDAR instruments with a polygonal planar board.“ Sensors 14.3 (2014): 5333-5353 wird statt eines Schachbrettes ein genau definiertes Rautenförmiges Objekt als Kalibriertarget benutzt. Kalibrierobjekte, so genau sie bei ihrer Erzeugung definiert waren, können sich über die Zeit verändern, etwa durch Abnutzung ihre Form oder Farbe verlieren. Ein exakt definiertes Kalibrierobjekt kann schwierig oder nur mit hohen Kosten zu beschaffen sein, oder es ist gerade nicht verfügbar, wenn man es beispielsweise während einer Messkampagne braucht.

**[0008]** Nach Scaramuzza, Davide, Ahad Harati, and Roland Siegwart. „Extrinsic self calibration of a camera and a 3d laser range finder from natural scenes.“ Intelligent Robots and Systems, 2007. IROS 2007. IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2007 wird zwar kein Kalibrierobjekt benutzt. Dafür müssen manuell Korrespondenzen definiert werden, die zur Transformationsschätzung benutzt werden, was einen hohen Aufwand bedeutet und je nach Erfahrung auch fehlerbehaftet ist.

**[0009]** Ein konzeptionell sehr einfaches Vorgehen besteht in einem einfachen manuellen Durchprobieren der sechs Translations- und Rotationsparameter, bis die geometrischen Daten des Laserscanners und die Kameradaten optisch deckungsgleich werden. Das ist aber meist sehr ungenau und schwer zu reproduzieren, weshalb die geschätzte Transforma-

tion eine geringe Wiederholgenauigkeit hat und die Genauigkeit auch nicht quantifizierbar ist.

**[0010]** Die WO 2013/155564 A1 offenbart ein verbundenes System aus einem 3D-Laserscanner und einem Bildsensor. Zwar wird auf die Notwendigkeit hingewiesen, beides zueinander zu kalibrieren, für das konkrete Vorgehen dann aber nur auf die bereits diskutierte akademische Literatur zurückgegriffen.

**[0011]** In der US 8 290 305 B2 wird ein Verfahren zur Registrierung einer 3D-Punktwolke und zweidimensionaler Bilddaten beschrieben. Einleitend wird dort eine Möglichkeit erwähnt, die jeweilige reflektierte Intensität des Abtaststrahls eines LIDAR-Systems zu messen und dadurch mit dem LIDAR ein 2D-Bild aufzunehmen, das einem üblichen 2D-Kamerabild mehr ähnelt als die 3D-Messdaten. Der Ansatz, dieses 2D-Bild der Registrierung zugrunde zu legen, wird dann aber wegen vieler Nachteile sofort verworfen.

**[0012]** Vor diesem Hintergrund ist Aufgabe der Erfindung, die erläuterte Kalibrierung zu verbessern.

**[0013]** Diese Aufgabe wird durch ein Verfahren zur Kalibrierung einer Kamera und eines Laserscanners nach Anspruch 1 sowie ein entsprechendes System nach Anspruch 14 gelöst. Als Ausgangspunkt nimmt die Kamera ein Kamerabild einer Szenerie auf. Der Laserscanner tastet die Szenerie ab und misst die jeweilige Intensität des remittierten oder reflektierten Abtaststrahls. Im Laufe der Abtastbewegung kann so ebenfalls ein Bild zusammengesetzt werden, das als Remissionsbild bezeichnet wird. Aus einem Vergleich von Kamerabild und Remissionsbild werden dann ein Versatz beziehungsweise eine Orientierung von Kamera und Laserscanner zueinander bestimmt. Diese Bestimmung einer Transformationsvorschrift zwischen den lokalen Koordinatensystemen wird auch Registrierung oder extrinsische Kalibrierung genannt.

**[0014]** Die Erfindung geht nun von dem Grundgedanken aus, eine Kalibrierung trotz der nur zweidimensionalen Ausgangsdaten in Kamera- und Remissionsbild auf Basis einer Korrespondenzsuche im dreidimensionalen Raum durchzuführen. Zu dem Remissionsbild gibt es Entfernungswerte aufgrund der Messung des Laserscanners. Für das Kamerabild werden Entfernungen rekonstruiert. Damit können dann 3D-3D-Korrespondenzen gefunden werden, d.h. übereinstimmende Merkmale wie beispielsweise Pixelgruppen, Kanten oder Ecken, besondere Kontraste und dergleichen. Eine ergänzende oder vorausgehende zweidimensionale Korrespondenzsuche in 2D ist aber nicht ausgeschlossen.

**[0015]** Die Erfindung hat den Vorteil, dass eine einfache, weitestgehend automatische extrinsische Kalibrierung ermöglicht wird. Sie liefert reproduzierba-

re Ergebnisse, wobei die Lösung auch durch ein Gütemaß bewertbar ist. Ein Kalibrierobjekt ist dafür nicht erforderlich. Es genügt jeweils ein statisches Kamera- und Remissionsbild, das Verfahren kommt ohne Bewegung von Kamera und Laserscanner aus. Dabei ist wichtig darauf hinzuweisen, dass sich gerade bei großen Sichtfeldern Kamerabild und Remissionsbild erst einmal nicht besonders ähnlich sind. Das stützt die Aussagen der oben zitierten US 8 290 305, dass eine Kalibrierung auf Basis von Kamerabild und Remissionsbild zunächst unbefriedigend ist. Das liegt neben den sichtbaren Unterschieden in den Ausgangsbildern auch daran, dass 2D-2D-Korrespondenzpaare nur schwache Beiträge zur Korrespondenzschätzung liefern. Die Erfindung zeigt, dass sehr wohl 3D-3D-Korrespondenzen gefunden werden können, was zu entscheidend besseren Ergebnissen führt, und damit eine stabile Transformationschätzung möglich ist.

**[0016]** Die Kamera ist vorzugsweise eine 2D-Kamera. Mit einer 3D-Kamera könnten Korrespondenzen direkt im dreidimensionalen Raum mit den jeweiligen Punktwolken von Kamera und Laserscanner gesucht werden.

**[0017]** Die Entfernungen in dem Kamerabild werden vorzugsweise mit Hilfe der Entfernungen des Remissionsbildes rekonstruiert. Da Kamera und Laserscanner zumindest teilweise die gleiche Szenerie aufgenommen haben, sind die Entfernungen durch die Messung mit dem Laserscanner prinzipiell bekannt. Sie können daher auf das Kamerabild übertragen werden, sobald beispielsweise im Rahmen einer Korrespondenzsuche bekannt ist, welche Entfernung zu welchem Bereich oder welchem Merkmal des Kamerabildes gehört.

**[0018]** Vorzugsweise werden erste Merkmale in dem Kamerabild bestimmt und vorgegebene Entfernungen projiziert. Diese Projektion nutzt vorzugsweise die Intrinsik oder die intrinsischen Parameter der Kamera, die wiederum bekannt oder durch eine an sich bekannte intrinsische Kalibrierung bestimmt sind. Noch bevorzugter wird auf die Einheitssphäre projiziert. Die dadurch gewonnenen Entfernungen sind nicht die tatsächlichen Entfernungen, zumindest für einen ersten Schritt einer Korrespondenzsuche im dreidimensionalen Raum jedoch geeignet. Es ist nicht ausgeschlossen, anstelle der Einheitssphäre einen anderen Radius oder sogar eine andere in den dreidimensionalen Raum eingebettete Fläche zu nutzen, aber davon sind eher Verzerrungen als bessere Ergebnisse zu erwarten.

**[0019]** Vorzugsweise werden zweite Merkmale in dem Remissionsbild bestimmt und auf vorgegebene Entfernungen projiziert, insbesondere auf die Einheitssphäre. Für die zweiten Merkmale sind die tatsächlichen Entfernungen aufgrund der Messung des

Laserscannern bekannt. Sie werden aber hier vorerst ignoriert und auf vorgegebene Entfernungen gesetzt. Die Projektion auf die Einheitssphäre ist rechnerisch sehr einfach, weil die Entfernungen auf radialen Strahlen gemessen werden und direkt auf Eins gesetzt werden können. Wie schon bei den ersten Merkmalen kann anstelle der Einheitssphäre ein anderer Radius oder sogar eine andere Fläche verwendet werden, jedoch sollten erste und zweite Merkmale auf die gleiche Fläche projiziert werden. Die gemessenen Entfernungen werden vorzugsweise nicht verworfen, sondern für spätere Schritte gespeichert.

**[0020]** Vorteilhafterweise wird eine erste Korrespondenzsuche im dreidimensionalen Raum zwischen den ersten Merkmalen und den zweiten Merkmalen durchgeführt. Die erste Korrespondenzsuche findet auf Basis von durch die Projektion entstandenen künstlichen Entfernungen statt, ist jedoch auch schon eine Korrespondenzsuche im dreidimensionalen Raum.

**[0021]** Vorzugsweise werden nur eineindeutige Korrespondenzpaare zugelassen und/oder in einer Umgebung eines Korrespondenzpaares keine weiteren Merkmale vorhanden sein dürfen. Die gefundenen Korrespondenzen werden also noch gefiltert, um nur anhand von besonders zuverlässigen Korrespondenzen zu kalibrieren. Dazu sollten also Korrespondenzen in beide Richtungen erkannt sein, und um Fehlzuordnungen zu reduzieren, sollten in der direkten Umgebung keine weiteren Merkmale zu finden sein.

**[0022]** Den ersten Merkmalen eines Korrespondenzpaares wird vorzugsweise die mit dem Laserscanner gemessene Entfernung des zugehörigen zweiten Merkmals zugewiesen, um korrigierte erste Merkmale zu gewinnen. Die Korrespondenz bedeutet, dass nach bisheriger Annahme die Kamera dasselbe Merkmal aufgenommen hat wie der Laserscanner. Daher ist die gemessene Entfernung des Laserscanners die bessere Schätzung als die festgelegte anfängliche Entfernung auf der Einheitssphäre. Die korrigierten ersten Merkmale sind folglich echte 3D-Merkmale, die nicht länger nur auf künstlichen Entfernungen basieren.

**[0023]** Vorzugsweise wird eine zweite Korrespondenzsuche im dreidimensionalen Raum zwischen den korrigierten ersten Merkmalen und den zweiten Merkmalen durchgeführt. Bei dieser erneuten Korrespondenzsuche sind die Merkmale nicht mehr auf eine vorgegebene Entfernung projiziert, sondern verwenden die gemessene Entfernung. Im Falle der zweiten Merkmale wurde diese Entfernung direkt durch den Laserscanner gemessen. Die korrigierten ersten Merkmale haben die Entfernung von dem korrespondierenden zweiten Merkmal übernommen. Es handelt sich folglich um eine echte 3D-Korrespondenzsuche, in der die Nachbarschaftsbeziehungen

auch in Entfernungsrichtung voll zum Tragen kommen.

**[0024]** Die ersten Merkmale und die zweiten Merkmale der gefundenen Korrespondenzpaare werden vorzugsweise durch eine insbesondere nichtlineare Optimierung von Versatz und/oder Orientierung bestmöglich übereinander gelegt. Dafür stehen mächtige Algorithmen zur Verfügung, und Versatz und Orientierung bei optimaler Übereinstimmung sind die gesuchten Transformationsparameter für die Kalibrierung beziehungsweise Sensorfusion.

**[0025]** Vorteilhafterweise wird eine Güte der Übereinstimmung berechnet. Die Optimierungsverfahren liefern eine derartige Güte meist mit, etwa in Form einer Kovarianzmatrix. Sie kann auch vorgegeben und beispielsweise als Abbruchkriterium der nichtlinearen Optimierung genutzt werden. Damit ist bekannt, wie groß beispielsweise der kumulierte Restfehler der übereinander gelegten Merkmale noch ist. Bewertet werden kann auch, wie gut die zugrunde gelegten Korrespondenzen waren.

**[0026]** Der Laserscanner ist bevorzugt ein 3D-Laserscanner. Der Laserscanner tastet also nicht nur durch eine Schwenk- oder Rotationsbewegung einer Ebene ab, sondern variiert auch den Nickwinkel. Die konkrete Raumkurve der Abtastbewegung ist für die Erfindung nicht von Belang. Jedenfalls wird auf diese Weise ein 2D-Remissionsbild erfasst, das mit dem 2D-Kamerabild besonders gut vergleichbar ist.

**[0027]** Die Szenerie für die Kalibrierung wird bevorzugt belassen, wie sie ist. Die Kalibrierung erfolgt also anhand natürlicher Merkmale, die in der Szenerie von Anfang an vorhanden sind. Das vereinfacht das Verfahren für den Anwender weiter. Insbesondere muss kein Kalibrierobjekt in der Szenerie angeordnet werden, und dementsprechend sind auch keine genauen Spezifikationen hinsichtlich Abmessungen und Form einzuhalten oder für das Verfahren vorzugeben.

**[0028]** Für die Kalibrierung wird alternativ mindestens ein Gegenstand mit einem gewünschten Remissionsverhalten in der Szenerie angeordnet, um den Kontrast zu erhöhen. Damit ist immer noch kein Kalibrierobjekt mit speziellen Eigenschaften oder Mustern gemeint. Es geht lediglich darum, in einer strukturlosen Szenerie, etwa einem leeren Raum mit weißen Wänden, für ausreichend Kontrast und damit potentielle Merkmale zu sorgen, mit denen Korrespondenzen gebildet werden können. Dafür genügen einfache und überall verfügbare Alltagsgegenstände, beispielsweise Pappe oder Fotokarton. Weiterhin müssen weder besondere Abmessungen eingehalten noch die Kalibrierung damit parametrisiert werden.

**[0029]** Das erfindungsgemäße System weist die Kamera, den Laserscanner sowie eine Auswertungsein-

heit auf, in der das Verfahren zur Kalibrierung abläuft. Die Auswertungseinheit kann in beliebiger Hardware realisiert und auch beliebig auf Kamera, Laserscanner und/oder ein speziell dafür angeschlossenes oder universelles externes Gerät wie ein Notebook oder ein Smartphone verteilt sein. Es bedarf lediglich einer gewissen Rechenleistung sowie des Zugriffs auf die Rohdaten von Kamera und Laserscanner.

**[0030]** Die Erfindung wird nachstehend auch hinsichtlich weiterer Merkmale und Vorteile beispielhaft anhand von Ausführungsformen und unter Bezug auf die beigefügte Zeichnung näher erläutert. Die Abbildungen der Zeichnung zeigen in:

**Fig. 1** eine schematische Darstellung einer Anordnung einer Kamera, eines Laserscanners und einer Auswertungseinheit zur Kalibrierung für eine Sensorfusion; und

**Fig. 2** ein beispielhaftes Ablaufschema einer Kalibrierung von Kamera und Laserscanner für deren Sensorfusion.

**[0031]** **Fig. 1** zeigt eine schematische Darstellung einer Anordnung einer Kamera **10** und eines Laserscanners **12**. Die Kamera **10** ist eine Farb- oder Monochromkamera, möglicherweise auch außerhalb des sichtbaren Spektrums wie bei einer IR-Kamera, die ein zweidimensionales Kamerabild einer Szenerie **14** aufnimmt.

**[0032]** Das Funktionsprinzip des Laserscanners **12** ist an sich bekannt und einleitend beschrieben. Für die Erfindung ist nicht relevant, welcher konkrete Aufbau für den Laserscanner **12** gewählt wird. Allerdings ist der Laserscanner **12** vorzugsweise ein 3D-Laserscanner, um einen zu dem Sichtfeld der Kamera **10** vergleichbaren Erfassungsbereich zu erhalten.

**[0033]** Der Laserscanner **12** erfasst ebenfalls die Szenerie **14**. Dabei gibt es einen Überlapp zwischen Sichtfeld der Kamera **10** und Erfassungsbereich des Laserscanners **12**, der vorzugsweise groß oder sogar vollständig ist, denn nur dort können die Daten für eine Kalibrierung genutzt werden und später im Betrieb diversitär zu einer Fusion beitragen. In nicht überlappenden Bereichen ist aber auch eine Datenfusion in dem Sinne möglich, dass an den Rändern zumindest die Kamera **10** oder der Laserscanner **12** noch Daten beiträgt. Typischerweise hat der Laserscanner **12** den breiteren Erfassungsbereich, aber die Kamera **10** kann durch Panoramaoptiken und dergleichen ebenfalls ein breites Sichtfeld erfassen.

**[0034]** Der Laserscanner **12** misst Entfernungen wie einleitend erläutert. Zugleich ist der Laserscanner **12** aber auch in der Lage, neben der Distanzmessung auch die Intensität des wieder empfangenen Abtaststrahls zu bestimmen. Dadurch lässt sich nach und nach im Verlauf der Abtastbewegung ein Remissi-

onsbild aufbauen. Da die jeweiligen S4 Winkelstellungen bekannt sind, können die gemessenen Intensitäten als Pixel des Remissionsbildes an die richtige Stelle gesetzt werden. Wenn der Laserscanner **12** nicht nur eine Ebene abtastet, sondern als 3D-Laserscanner auch den Nickwinkel variiert, ist das Remissionsbild ein zweidimensionales Bild. Die Aufnahme von Kamera- und Remissionsbild erfolgt für die nachfolgend erläuterte Kalibrierung möglichst gleichzeitig, jedenfalls so, dass die Szenerie als quasi-statisch betrachtet werden kann, weil sonst Kalibrationsfehler resultieren.

**[0035]** Über eine Kameraschnittstelle **16** ist die Kamera **10** und über eine Laserscannerschnittstelle **18** der Laserscanner **12** an eine Auswertungseinheit **20** angeschlossen. Dabei kann es sich um eine übergeordnete Steuerung, ein Notebook oder dergleichen handeln. Die hier externe Auswertungseinheit **20** kann alternativ zumindest teilweise intern in Kamera **10** und/oder Laserscanner **12** vorgesehen sein.

**[0036]** Die Auswertungseinheit **20** empfängt das Kamerabild, das Remissionsbild sowie die 3D-Punktwolke der von dem Laserscanner **12** gemessenen Entfernungen oder entsprechende Rohdaten in beliebiger Verarbeitungsstufe, um diese Daten selbst zu gewinnen. Damit erfolgt dann eine Kalibrierung von Kamera **10** und Laserscanner **12** wie nachfolgend beschrieben. Im Betrieb ist somit bekannt, wie die Daten der Kamera **10** und des Laserscanners **12** unter Berücksichtigung von gegenseitigem Versatz und/oder Verkipfung miteinander fusioniert werden können.

**[0037]** **Fig. 2** zeigt ein Ablaufschema der Kalibrierung von Kamera **10** und Laserscanner **12**. Dabei handelt es sich um ein Beispiel. Insbesondere müssen keineswegs sämtliche Schritte implementiert werden, vielmehr sind mehrere der genannten Schritte rein optional.

**[0038]** In einem Schritt **S1** wird das Kamerabild auf markante Stellen untersucht, beispielsweise Stellen mit hohem Kontrast. Einige bekannte Algorithmen dafür sind Harris-Corner-Detektion und weitere Feature-Detektoren wie SIFT (Scale-Invariant Feature Transform), SURF (Speeded Up Robust Features), ORB (Oriented FAST and rotated BRIEF) oder Ähnliches. Dadurch kann eine Menge von ersten Merkmalen des Kamerabildes bestimmt werden, wobei mindestens drei Elemente für das weitere Verfahren erforderlich sind.

**[0039]** In einem Schritt **S2** werden die ersten Merkmale aus dem zweidimensionalen Kamerabild in den dreidimensionalen Raum projiziert. Das ist möglich, wenn die Intrinsik der Kamera **10** bekannt oder in einer entsprechenden Kalibration bestimmt ist, also insbesondere die Lage des optischen Zentrums innerhalb der Kamera **10**. Ohne Kenntnis der Entfer-

nung kann aber nur in festgelegte, nicht tatsächliche Entfernungen projiziert werden, vorzugsweise auf die Einheitssphäre.

**[0040]** In einem Schritt **S3** werden auch in dem Remissionsbild markante Stellen gesucht. Das Vorgehen entspricht dem Schritt **S1**, und das Ergebnis ist eine Menge von zweiten Merkmalen des Remissionsbildes.

**[0041]** In einem Schritt **S4** werden die zweiten Merkmale auf Entfernungen entsprechend den ersten Merkmalen gesetzt. An sich wäre für die zweiten Merkmale auch die tatsächliche Entfernung bekannt, die der Laserscanner **12** gemessen hat. Für das weitere Verfahren sollen aber erste und zweite Merkmale vergleichbar sein, vorzugsweise beide auf der Einheitssphäre.

**[0042]** In einem Schritt **S5** werden nun Übereinstimmungen zwischen den ersten Merkmalen und den zweiten Merkmalen gesucht. Korrespondenzpaare können in an sich bekannter Weise beispielsweise durch eine Nächste-Nachbarn-Suche bestimmt werden. Dieser Schritt führt zu einer erheblichen Verbesserung, weil die ursprünglichen Kamera- und Remissionsbilder einander rein visuell keineswegs entsprechen. Das gilt vor allem bei großen Sichtwinkeln, etwa wenn es sich um einen um die optische Achse rotierenden Aufbau handelt und Kamera **10** und Laserscanner **12** jeweils über einen Sichtbereich von bis zu  $180^\circ$  oder noch mehr aufweisen.

**[0043]** In einem Schritt **S6** werden die gefundenen Korrespondenzpaare noch gefiltert, damit nur besonders hochwertige Korrespondenzen verbleiben. Mögliche Forderungen sind eineindeutige Korrespondenzpaare oder dass die verwendeten Merkmale in ihrer jeweiligen näheren Nachbarschaft keine weiteren Merkmale aufweisen. Sind die Merkmale innerhalb eines Bildes weit genug voneinander entfernt, dann ist die Zuordnung zwischen Kamera **10** und Laserscanner **12** eineindeutig. Der Abstand der Merkmale im Bild hängt mit der Größe des Objektes im Kalibrierraum zusammen, und deshalb kann unter Umständen Eineindeutigkeit manuell forciert werden, indem größere Objekte in die Szenerie **14** eingebracht werden.

**[0044]** In einem Schritt **S7** wird jeweils aus Korrespondenzpaaren den ersten Merkmalen des Kamerabildes die Entfernung des zugehörigen zweiten Merkmals des Remissionsbildes zugewiesen. Für das zweite Merkmal ist die Entfernung durch Messung des Laserscanners **12** bekannt, das künstliche Festlegen im Schritt **S4** findet jetzt nicht mehr statt. Dadurch liegen die Merkmale jetzt nicht mehr auf der Einheitssphäre, sondern entsprechend der Messung und Zuweisung im dreidimensionalen Raum.

**[0045]** In einem Schritt **S8** wird auf dieser Basis eine erneute Korrespondenzsuche vorzugsweise mit einem engeren Distanzkriterium durchgeführt. Dies ergibt eine verbesserte Korrespondenzliste und ist auch in einer Visualisierung leichter nachzuvollziehen als die Nachbarschaft auf der Einheitssphäre.

**[0046]** In einem Schritt **S9** werden die gefundenen Korrespondenzen im dreidimensionalen Raum benutzt, um die extrinsische Transformation mit einem nicht-linearen Optimierungsverfahren zu schätzen. Eine beispielhafte Möglichkeit ist ein Iterative-Closest-Point-Verfahren. Aber auch eine Formulierung als linearisiertes Ausgleichsproblem ist denkbar, das über Gauß-Newton auf Mannigfaltigkeiten gelöst wird. Dadurch lassen sich Probleme mit euklidischen Winkeln vermeiden („Gimbal Lock“). Robuste, korrespondenzfehlertolerante Optimierungstechniken wie „Robust Kernels“ oder M-Estimatoren sind ebenfalls denkbar.

**[0047]** In einem Schritt **S10** kann anhand der Korrespondenzen und der Rückprojektion mathematisch auch ein Gütemaß für die ermittelte Lösung abgeleitet werden, etwa über eine Kovarianzmatrix. Es ist auch denkbar, den Schritt **S9** oder frühere Schritte zu wiederholen, wenn das Gütemaß noch unbefriedigend ist. Zumindest können falsche Lösungen als solche erkannt und im Einsatz vermieden werden.

**[0048]** Die als Ergebnis gewonnene Transformationsvorschrift umfasst allgemein Versatz und Orientierung mit drei Freiheitsgraden der Translation und drei Freiheitsgraden der Rotation, also die volle gegenseitige 6D-Lage. Es kann aber auch Rahmenbedingungen geben, welche Freiheitsgrade von vorneherein festlegen oder uninteressant machen, wo es dann ausreicht, nur einen entsprechenden Teil der Transformationsvorschrift in weniger Dimensionen zu bestimmen. Ob der gemeinsame Ursprung für die Transformation bei der Kamera **10**, dem Laserscanner **12** oder an einer anderen Position liegt, kann frei gewählt werden. Es ist auch äquivalent, eine Umrechnung zwischen den zwei lokalen Koordinatensystemen von Kamera **10** und Laserscanner **12** oder in ein globales Koordinatensystem zu bestimmen.

**[0049]** Die Szenerie **14** kann schon ohne jegliche Maßnahme genug Kontrast aufweisen, um Merkmale in Kamerabild und Remissionsbild zu finden und damit die Kalibrierung auszuführen, so dass das Einbringen von weiteren Objekten unnötig ist. Falls aber die Szenerie **14** kontrastarm ist, was schon anfänglich oder möglicherweise erst an einem unzureichenden Gütemaß in Schritt **S10** erkannt wird, können einfache Objekte wie etwa weiße, schwarze oder farbige Pappen in der Szenerie **14** angeordnet werden. Eine größere weiße unter einer schwarzen Pappe bietet einen verlässlichen starken Kontrast. Falls die Kamera **10** im IR-Spektrum aufzeichnet, sollte der Kontrast

auch dort bestehen, was aber durch das genannte Beispiel auch gewährleistet wäre. Der oder die Objekte werden für Kamera **10** und Laserscanner **12** sichtbar in der Szenerie **14** angeordnet. Kalibrierobjekte mit besonderen Mustern und Abmessungen sind in keinem Fall notwendig, auch wenn sie sich mit ihren Kontrasten natürlich ebenfalls eignen würden.

## ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

*Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.*

### Zitierte Patentliteratur

- DE 102008032216 A1 [0003]
- EP 1965225 A2 [0003]
- WO 2013/155564 A1 [0010]
- US 8290305 B2 [0011]
- US 8290305 [0015]

### Zitierte Nicht-Patentliteratur

- Pandey, Gaurav, et al. „Extrinsic calibration of a 3d laser scanner and an omnidirectional camera.“ IFAC Proceedings Volumes 43.16 (2010): 336-341 [0007]
- Park, Yoonsu, et al. „Calibration between color camera and 3D LIDAR instruments with a polygonal planar board.“ Sensors 14.3 (2014): 5333-5353 [0007]

**Patentansprüche**

1. Verfahren zur Kalibrierung einer Kamera (10) und eines Laserscanners (12) für deren Sensorfusion, bei dem die Kamera (10) ein Kamerabild einer Szenerie (14) aufnimmt und der Laserscanner (12) die Szenerie (14) zumindest teilweise mit einem Abtaststrahl abtastet und aus der jeweiligen Winkelposition des Abtaststrahls und der in der Winkelposition bestimmten Intensität des aus der Szenerie (14) remittierten Abtaststrahls ein Remissionsbild aufzeichnet, wobei aus einem Vergleich von Kamerabild und Remissionsbild ein Versatz und/oder eine relative Orientierung zwischen Kamera (10) und Laserscanner (12) bestimmt wird, **dadurch gekennzeichnet**, dass mit dem Laserscanner (12) zu dem Remissionsbild auch Entfernungen bestimmt werden, dass zu dem Kamerabild Entfernungen rekonstruiert werden und dass für den Vergleich eine Korrespondenzsuche von in dem Kamerabild und in dem Remissionsbild übereinstimmenden Merkmalen im dreidimensionalen Raum durchgeführt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei die Entfernungen in dem Kamerabild mit Hilfe der Entfernungen des Remissionsbildes rekonstruiert werden.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, wobei erste Merkmale in dem Kamerabild bestimmt und auf vorgegebene Entfernungen projiziert werden, insbesondere auf die Einheitssphäre.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei zweite Merkmale in dem Remissionsbild bestimmt und auf vorgegebene Entfernungen projiziert werden, insbesondere auf die Einheitssphäre.

5. Verfahren nach Anspruch 3 und 4, wobei eine erste Korrespondenzsuche im dreidimensionalen Raum zwischen den ersten Merkmalen und den zweiten Merkmalen durchgeführt wird.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei nur eindeutige Korrespondenzpaare zugelassen werden und/oder in einer Umgebung eines Korrespondenzpaares keine weiteren Merkmale vorhanden sein dürfen.

7. Verfahren nach Anspruch 5 oder 6, wobei den ersten Merkmalen eines Korrespondenzpaares die mit dem Laserscanner (12) gemessene Entfernung des zugehörigen zweiten Merkmals zugewiesen wird, um korrigierte erste Merkmale zu gewinnen.

8. Verfahren nach Anspruch 7, wobei eine zweite Korrespondenzsuche im dreidimensionalen Raum zwischen den korrigierten ersten Merkmalen und den zweiten Merkmalen durchgeführt wird.

9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die übereinstimmenden Merkmale durch eine insbesondere nichtlineare Optimierung von Versatz und/oder Orientierung bestmöglich übereinander gelegt werden.

10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei eine Güte der Optimierung berechnet wird.

11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei der Laserscanner (12) ein 3D-Laserscanner ist.

12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Szenerie für die Kalibrierung belassen wird, wie sie ist, insbesondere kein Kalibrierobjekt in der Szenerie (14) angeordnet wird.

13. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 11, wobei für die Kalibrierung mindestens ein Gegenstand mit einem gewünschten Remissionsverhalten in der Szenerie (14) angeordnet wird, um den Kontrast zu erhöhen.

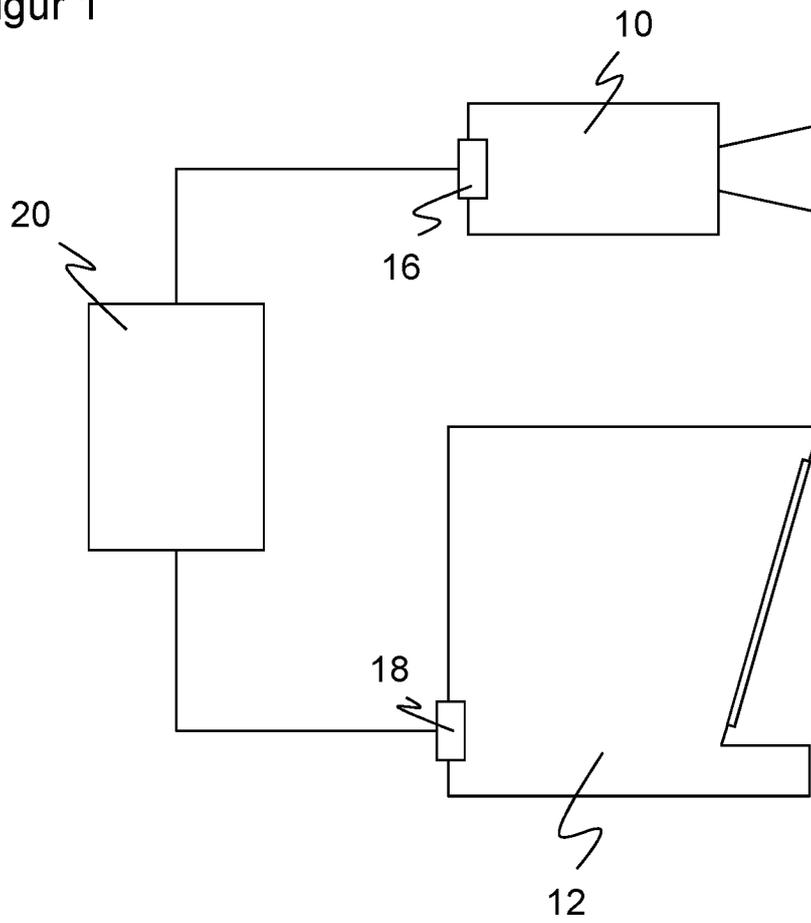
14. System aus einer Kamera (10) und einem Laserscanner (12) sowie einer Auswertungseinheit (20), die dafür ausgebildet ist, Kamera (10) und Laserscanner zueinander (12) mit einem Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche zu kalibrieren.

Es folgen 2 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

Figur 1

14



Figur 2

