



(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2021 212 601.4**

(22) Anmeldetag: **09.11.2021**

(43) Offenlegungstag: **11.05.2023**

(51) Int Cl.: **G02B 27/62 (2006.01)**

G06N 20/00 (2019.01)

(71) Anmelder:

**Robert Bosch Gesellschaft mit beschränkter
Haftung, 70469 Stuttgart, DE**

(72) Erfinder:

**Windisch, Tobias, 87509 Immenstadt, DE;
Geisselmann, Benno, 87527 Sonthofen, DE;
Loewendorf, Steffen, 87439 Kempten, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE	10 2017 011 463	A1
US	2021 / 0 232 216	A1
JP	2021- 97 989	A

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Rechercheantrag gemäß § 43 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Verfahren und Vorrichtung zum Ausrichten eines Linsensystems**

(57) Zusammenfassung: Verfahren (100) zum Ermitteln einer Ausrichtung (A) eines Linsensystems (L) umfassend die Schritte:

a. Ausrichten (101) des Linsensystems (L) gemäß einer bereitgestellten ersten Ausrichtung;

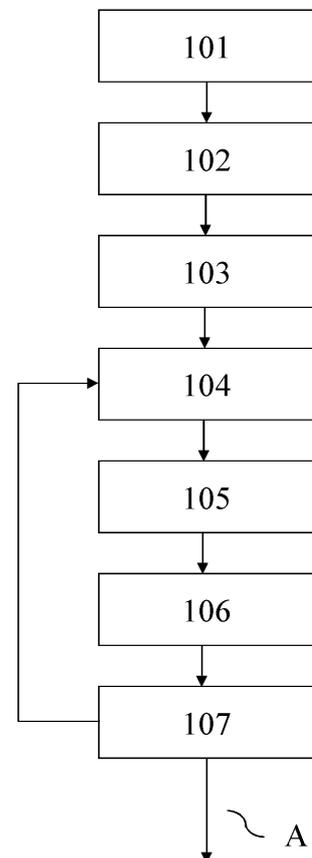
b. Ermitteln (102) eines ersten gebrochenen optischen Signals (G), wobei das erste gebrochene optische Signal (G) durch eine Brechung eines ersten ausgesendeten optischen Signals (E) an dem gemäß der ersten Ausrichtung ausgerichteten Linsensystems (L) ermittelt wird;

c. Ermitteln (103) eines ersten Eigenschaftswerts, wobei der erste Eigenschaftswert eine Eigenschaft des ersten gebrochenen optischen Signals (G) charakterisiert;

d. Trainieren (104) eines ersten maschinellen Lernsystems abhängig von der ersten Ausrichtung und dem ermittelten ersten Eigenschaftswert, wobei das maschinelle Lernsystem ausgebildet ist, zu einer Ausrichtung eine Ausgabe zu ermitteln, die die Eigenschaft der Ausrichtung charakterisiert;

e. Ermitteln der Ausrichtung (A) des Linsensystems (L) basierend auf einer Ausgabe des ersten maschinellen Lernsystems.

100 ~



Beschreibung

Technisches Gebiet

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Ermitteln einer Ausrichtung eines Linsensystems, eine Vorrichtung zur Ausrichtung eines Linsensystems, ein Computerprogramm und ein maschinenlesbares Speichermedium.

Vorteile der Erfindung

[0002] Bei der Fertigung eines optischen Systems, wie etwa einem optischen Sensor, einem Teleskop oder einem Mikroskop, besteht eine wiederkehrende Problemstellung darin, dass ein Linsensystem, z.B. eine einzelne Linse oder eine Mehrzahl von Linsen in einem Objektiv, des optischen Systems geeignet ausgerichtet werden soll. Zum Beispiel kann gefordert sein, dass ein Linsensystem derart ausgerichtet ist, dass ihr Brennpunkt an einem vorgebbaren Punkt liegt und/oder dass eine Brennweite des optischen Systems einen vorgebbaren Wert erreicht.

[0003] Bedingt durch Fertigungstoleranzen sowohl des Linsensystems als auch anderer Komponenten des optischen Systems, ist das Auffinden einer geeigneten Ausrichtung des Linsensystems eine schwierige Problemstellung. Durch die entsprechenden Toleranzen ergibt sich die Situation, dass im Allgemeinen nicht davon ausgegangen werden kann, dass eine geeignete Ausrichtung eines ersten Linsensystems eine geeignete Ausrichtung eines zweiten Linsensystems darstellt. Falls eine hohe Stückzahl des optischen Systems gefertigt werden soll, ist daher ein Verfahren wünschenswert, dass ein Linsensystem auf das optische System abgestimmt ausrichtet (im Sinne der variierenden Eigenschaften zwischen Produkten eines gleichen Fertigungsprozesses).

[0004] Hierbei ist wünschenswert, dass ein Ausrichtungsprozess des Linsensystems in kürzest möglicher Zeit durchgeführt wird, insbesondere dann, wenn Linsensysteme einer Mehrzahl von optischen Systemen ausgerichtet werden sollen. Es ist beispielsweise möglich, für Ausrichtungen einer vorgebbaren Mehrzahl von Ausrichtungen jeweils zu ermitteln, ob die jeweilige Ausrichtung des Linsensystems für das optische System geeignet ist. Hierfür können insbesondere mögliche Ausrichtungen des Linsensystems in äquidistanten Schritten quantisiert werden und das Linsensystem entsprechend der so quantisierten Ausrichtungen ausgerichtet werden. Diese Herangehensweise ist auch als Rastersuche (engl. Grid Search) bekannt.

[0005] Der Nachteil dieses erschöpfenden Ansatzes ist jedoch, dass die Quantisierung typischerweise sehr feingranular sein muss, damit eine geeignete

Ausrichtung durch die Quantisierung zumindest näherungsweise abgebildet ist und nicht „übersprungen“ wird. Diese Form des Auffindens einer Ausrichtung des Linsensystems bedingt daher typischerweise einen hohen zeitlichen Aufwand, da das Linsensystem gemäß aller Ausrichtungen des Rasters ausgerichtet und ausgewertet werden muss.

[0006] Es ist wünschenswert, die Anzahl der zu untersuchenden Ausrichtungen möglichst gering zu halten. Dies stellt ein schwieriges Problem dar, da, bedingt durch die oben beschriebenen Toleranzen, die für ein entsprechendes Linsensystem geeignete Ausrichtung a priori nur bedingt eingegrenzt werden kann.

[0007] Das Verfahren mit Merkmalen des unabhängigen Anspruchs 1 ist in der Lage, basierend auf einem maschinellen Lernsystem eine geeignete Ausrichtung eines Linsensystems zu ermitteln. Die Erfinder konnten feststellen, dass der geeignete Einsatz des maschinellen Lernsystems dazu führt, dass eine wesentlich geringere Anzahl an Ausrichtungen ausgewertet werden muss als mit bekannten Verfahren.

Offenbarung der Erfindung

[0008] In einem ersten Aspekt betrifft die Erfindung ein Verfahren zum Ermitteln einer Ausrichtung eines Linsensystems umfassend die Schritte:

- a. Ausrichten des Linsensystems gemäß einer bereitgestellten ersten Ausrichtung;
- b. Ermitteln eines ersten gebrochenen optischen Signals, wobei das erste gebrochene optische Signal durch eine Brechung eines ersten ausgesendeten optischen Signals an dem gemäß der ersten Ausrichtung ausgerichteten Linsensystems ermittelt wird;
- c. Ermitteln eines ersten Eigenschaftswerts, wobei der erste Eigenschaftswert eine Eigenschaft des ersten gebrochenen optischen Signals charakterisiert;
- d. Trainieren eines ersten maschinellen Lernsystems abhängig von der ersten Ausrichtung und dem ermittelten ersten Eigenschaftswert, wobei das maschinelle Lernsystem ausgebildet ist, zu einer Ausrichtung eine Ausgabe zu ermitteln, die die Eigenschaft der Ausrichtung charakterisiert;
- e. Ermitteln der Ausrichtung des Linsensystems basierend auf einer Ausgabe des ersten maschinellen Lernsystems.

[0009] Ein Linsensystem kann als eine Linse verstanden. Alternativ kann ein Linsensystem auch als eine Mehrzahl von Linsen verstanden werden. Beispielsweise kann ein Objektiv als ein Linsensystem verstanden werden.

[0010] Eine Ausrichtung eines Linsensystems kann als eine relative Anordnung des Linsensystems bezüglich eines vorgegebenen Punktes verstanden werden. Beispielsweise kann das Linsensystem bezüglich eines gewünschten Fokuspunktes und/oder bezüglich einer gewünschten Brennweite ausgerichtet werden. Mit anderen Worten, charakterisiert eine Ausrichtung Freiheitsgrade entsprechend welcher das Linsensystem im dreidimensionalen Raum ausgerichtet werden kann.

[0011] Eine Ausrichtung kann insbesondere als eine Orientierung und Positionierung eines Linsensystems in einem dreidimensionalen Raum verstanden werden. Insbesondere kann eine Ausrichtung durch einen sechsdimensionalen Vektor charakterisiert werden, wobei der Vektor eine Position entlang drei Achsen des dreidimensionalen Raums charakterisiert sowie jeweils eine Rotation um die Achsen charakterisiert. Alternativ ist auch möglich, dass eine Ausrichtung durch eine Quaternion charakterisiert wird. Alternativ ist auch möglich, dass eine Ausrichtung durch Euler-Winkel charakterisiert wird.

[0012] Das Verfahren zum Ermitteln der Ausrichtung kann insbesondere als ein computerimplementiertes Verfahren verstanden werden, die Schritte also von einem Computer ausgeführt werden. Der Schritt des Ausrichtens des Linsensystems kann dabei derart verstanden werden, dass vom Computer Ansteuersignale ermittelt werden, die das Linsensystem geeignet ausrichten.

[0013] Das Verfahren kann derart verstanden werden, dass für die erste Ausrichtung der erste Eigenschaftswert ermittelt wird und basierend auf dem ersten Eigenschaftswert ermittelt wird, ob die Ausrichtung bezüglich der Eigenschaft geeignet ist. Hierfür wird ein optisches Signal durch das entsprechend der ersten Ausrichtung ausgerichtete Linsensystem ausgesendet (das ausgesendete optische Signal). Durch das Linsensystem wird das ausgesendete optische Signal gebrochen. Das so gebrochene optische Signal kann anschließend beispielsweise in einer Empfangseinheit empfangen werden. Anschließend kann der Eigenschaftswert des gebrochenen Signals ermittelt werden.

[0014] Vorzugsweise wird das ausgesendete optische Signal von einer Aussendeereinheit ausgesendet. Vorzugsweise sind ferner die Aussendeereinheit und die Empfangseinheit in Position und Orientierung fixiert, sodass der erste Eigenschaftswert für das Linsensystem nur durch die erste Ausrichtung beeinflusst wird.

[0015] Die Eigenschaft kann beispielsweise eine Fokussierung, Stärke oder Position des gebrochenen optischen Signals charakterisieren, die durch die Empfangseinheit gemessen wird. Da das gebro-

chene optische Signal maßgeblich durch die erste Ausrichtung bestimmt wird, kann der ermittelte erste Eigenschaftswert als ein Maß für die erste Ausrichtung verstanden werden. Generell wird im Folgenden verstanden, dass ein Eigenschaftswert bzgl. einer Ausrichtung den Eigenschaftswert darstellt, der ermittelt wird, wenn das Linsensystem gemäß der Ausrichtung ausgerichtet wird und das gebrochene optische Signal bezüglich des Eigenschaftswert ausgewertet wird. Insbesondere können auch mehrere erste Eigenschaftswerte vom ersten maschinellen Lernsystem ermittelt werden, z.B. wenn mehrere Eigenschaften der Ausrichtung untersucht werden sollen oder in die Optimierung der Ausrichtung des Linsensystems mit einfließen sollen.

[0016] Ziel des Verfahrens kann vorzugsweise sein, dass das Linsensystem derart ausgerichtet wird, dass der erste Eigenschaftswert in einem vorgebbaren Wertebereich liegt bzw. die ersten Eigenschaftswerte in jeweils einem vorgebbaren Wertebereich liegen. Vorteilhafterweise wird hierfür basierend auf der Ausgabe des ersten maschinellen Lernsystems eine geeignete Ausrichtung des Linsensystems geschätzt. Hierfür wird das Linsensystem zunächst gemäß der ersten Ausrichtung ausgerichtet und der erste Eigenschaftswert bzw. die ersten Eigenschaftswerte ermittelt. Anschließend kann das erste maschinelle Lernsystem derart trainiert werden, dass es bezüglich der ersten Ausrichtung den ersten Eigenschaftswert bzw. die ersten Eigenschaftswerte prädiziert. Mit anderen Worten, das erste maschinelle Lernsystem kann derart trainiert werden, dass es für das Linsensystem spezifisch lernt, welche Ausrichtung zu welchem Eigenschaftswert führt. Wird das Verfahren zum Ausrichten einer Mehrzahl von Linsen verwendet, kann so jeweils ein für ein Linsensystem spezifisches erstes maschinelles Lernsystem trainiert werden.

[0017] Vorzugsweise können im Verfahren auch mehrere erste Ausrichtungen bereitgestellt werden und für die ersten Ausrichtungen jeweils der erste Eigenschaftswert bzw. die ersten Eigenschaftswerte ermittelt werden. Eine Ausgabe des ersten maschinellen Lernsystems kann als eine Schätzung eines Eigenschaftswerts bzw. einer Mehrzahl von Eigenschaftswerten einer dem ersten maschinellen Lernsystem übergebenen Ausrichtung verstanden werden.

[0018] Während zum Ermitteln eines Eigenschaftswert bzw. einer Mehrzahl von Eigenschaftswerten bzgl. einer Ausrichtung das Linsensystem entsprechend der Ausrichtung ausgerichtet wird, kann zum Schätzen des Eigenschaftswerts bzw. der Mehrzahl von Eigenschaftswerten lediglich das erste maschinelle Lernsystem ausgewertet werden. Die Erfinder konnten feststellen, dass durch das Verfahren wesentlich weniger zweite Ausrichtungen ermittelt

werden müssen, bis die Ausrichtung des Linsensystems geeignet ist und so der Prozess des Ausrichtens des Linsensystems wesentlich beschleunigt wird.

[0019] Für den Rest der Beschreibung werden insbesondere Ausführungsformen beschrieben, die sich auf die Ermittlung und Ausgabe eines Eigenschaftswertes beziehen. Es versteht sich, dass an diesen Stellen dem Fachmann klar ist, dass auch mehrere Eigenschaftswerte ermittelt bzw. ausgegeben werden können.

[0020] Vorteilhafterweise muss durch das Verfahren nur eine verhältnismäßig kleine Anzahl an ersten Ausrichtungen für das Linsensystem eingestellt und ausgewertet werden. Der Prozess des Schätzens kann als ein virtuelles Ausrichten und Auswerten einer Ausrichtung des Linsensystems verstanden werden. Hierdurch kann eine Vielzahl von Ausrichtungen wesentlich schneller ausgewertet werden als ein reales Ausrichten und Auswerten des Linsensystems.

[0021] Insbesondere kann ein Ausrichten des Linsensystems gemäß einer Ausrichtung derart verstanden werden, dass das Linsensystem auf einem Prüfstand ausgerichtet wird. Ein Auswerten der Eigenschaft der Ausrichtung kann dann derart verstanden werden, dass auf dem Prüfstand ein optisches Signal durch das Linsensystem gesendet wird, das optische Signal am Linsensystem gebrochen wird und das gebrochene optische Signal anschließend von einer Empfangseinheit verarbeitet wird, um einen Eigenschaftswert zu ermitteln, der die Eigenschaft charakterisiert.

[0022] In verschiedenen bevorzugten Ausführungsformen des Verfahrens ist möglich, dass das Ermitteln der Ausrichtung des Linsensystems basierend auf der Ausgabe des ersten maschinellen Lernsystems folgende Schritte umfasst:

- f. Ermitteln einer zweiten Ausrichtung derart, dass eine für die zweite Ausrichtung ermittelte Ausgabe des ersten maschinellen Lernsystems in einem vorgebbaren Wertebereich liegt;
- g. Ermitteln eines zweiten gebrochenen optischen Signals, wobei das zweite gebrochene optische Signal durch eine Brechung eines zweiten ausgesendeten optischen Signals an der gemäß der zweiten Ausrichtung ausgerichteten Linse ermittelt wird;
- h. Ermitteln eines zweiten Eigenschaftswerts, wobei der zweite Eigenschaftswert die Eigenschaft des zweiten gebrochenen optischen Signals charakterisiert;
- i. Falls der für die zweite Ausrichtung zweite Eigenschaftswert nicht in einem für den zweiten

Eigenschaftswert vorgebbaren Wertebereich liegt, wiederholen der Schritte d., f., g. und h., wobei die zweite Ausrichtung als zusätzliche erste Ausrichtung zum Trainieren des ersten maschinellen Lernsystems verwendet wird; Andernfalls bereitstellen der zweiten Ausrichtung als Ausrichtung des Linsensystems.

[0023] Die beschriebenen Ausführungsformen können als ein iteratives Verfahren verstanden werden. In den jeweiligen Iterationen wird jeweils eine Ausrichtung ermittelt, das maschinelle Lernsystem mit der Ausrichtung trainiert und anschließend eine bessere Ausrichtung des Linsensystems basierend auf der Ausgabe des maschinellen Lernsystems ermittelt. Dies kann derart verstanden werden, dass die Schätzung des maschinellen Lernsystems bezüglich einer geeigneten Ausrichtung des Linsensystems in der Realität über ein Ausrichten des Linsensystems und Ermitteln des Eigenschaftswerts bzgl. der Ausrichtung überprüft wird. Hierdurch konvergiert das maschinelle Lernsystem immer weiter dahin den tatsächlichen Eigenschaftswert bzgl. der Ausrichtung immer genauer zu schätzen. Die Erfinder konnten feststellen, dass die Konvergenz vorteilhafterweise sehr schnell einsetzt und so nach wenigen Iterationen bereits eine geeignete Ausrichtung des Linsensystems ermittelt wird.

[0024] Vorteilhafterweise können das in einer Iteration ermittelte Paar aus zweiter Ausrichtung und zweitem Eigenschaftswert in einer folgenden Iteration zu den Trainingsdaten des ersten maschinellen Lernsystems hinzugefügt werden. Hierdurch wird dem ersten maschinellen Lernsystem in jeder Iteration mehr Wissen über das Verhältnis einer Ausrichtung zum Eigenschaftswert bzgl. der Ausrichtung übermittelt. Dadurch konvergiert das Verfahren noch schneller.

[0025] Dieses Vorgehen kann auch als eine Form des aktiven Lernens (engl. active learning) verstanden werden. Durch das erste maschinelle Lernsystem werden iterativ Punkte ermittelt (die zweiten Ausrichtungen), für die jeweils in der Realität ein vom ersten maschinellen Lernsystem zu bestimmender Wert (der zweite Eigenschaftswert) ermittelt wird. Die so ermittelten Paare können dann für ein weiteres Training des ersten maschinellen Lernsystems verwendet werden.

[0026] Die aufwendige Berechnung einer geeigneten Ausrichtung kann daher vorteilhafterweise durch eine Optimierung einer Approximation ermittelt werden, wobei die Approximation durch das maschinelle Lernsystem ermittelt wird. Die durch die Optimierung der Approximation erhaltene Ausrichtung kann anschließend getestet werden, indem das Linsensystem entsprechend der erhaltenen Ausrichtung ausgerichtet wird. Durch das iterative Verfahren

wird die Approximation immer genauer, wodurch vorteilhafterweise bereits nach einer kleinen Anzahl von Iterationsschritten eine geeignete Ausrichtung gefunden wird.

[0027] Eine zweite Ausrichtung kann hierbei als geeignet verstanden werden, wenn der zweite Eigenschaftswert im vorgebbaren Wertebereich liegt. Der vorgebbare Wertebereich des zweiten Eigenschaftswerts kann insbesondere der gleiche sein, wie der vorgebbare Wertebereich für den ersten Eigenschaftswert.

[0028] Zur Bestimmung der zweiten Ausrichtung kann insbesondere ein Optimierungsproblem gelöst werden, wobei eine Ausrichtung als zweite Ausrichtung bereitgestellt wird, für die ein entsprechender zweiter Eigenschaftswert maximiert oder minimiert wird.

[0029] Vorzugsweise ist im Verfahren auch möglich, dass die zweite Ausrichtung basierend auf einer Optimierung ermittelt wird, wobei eine Nebenbedingung ein Einhalten zumindest einer Grenze des vorgebbaren Wertebereichs des zweiten Eigenschaftswerts charakterisiert.

[0030] Die Optimierung kann vorzugsweise durch die Formel

$$\operatorname{argmax}_x s$$

wobei $p(x) - s \geq l$,

$$p(x) + s \leq u,$$

$$s \geq 0$$

charakterisiert werden, wobei x eine Ausrichtung ist, $p(x)$ der vom ersten maschinellen Lernsystem für die Ausrichtung ermittelte zweite Eigenschaftswert ist, l eine untere Grenze des vorgebbaren Wertebereichs ist und u eine obere Grenze des vorgebbaren Wertebereichs ist.

[0031] In allen Ausprägungen des Verfahrens ist grundsätzlich auch möglich, dass mehr als eine Eigenschaft für eine Ausrichtung untersucht wird. Für den Fall, dass der zweite Eigenschaftswert direkt optimiert wird, kann für den Fall von mehreren zu untersuchenden Eigenschaften (also bei Vorliegen einer Mehrzahl von ersten Eigenschaftswerten bzw. einer Mehrzahl von zweiten Eigenschaftswerten) eine Pareto-Optimierung durchgeführt werden. Für den Fall der Optimierung unter Nebenbedingungen können jeweils Nebenbedingungen bezüglich vorgegebener Wertebereiche für die jeweiligen Eigenschaften ergänzt werden.

[0032] Vorzugsweise ist auch möglich, dass das erste maschinelle Lernsystem zunächst vortrainiert

wird. Das anschließende Training des ersten maschinellen Lernsystems kann dann als eine Feinjustierung (engl. finetuning) des ersten maschinellen Lernsystems verstanden werden. Durch das Vortrainieren wird das erste maschinelle Lernsystem in die Lage versetzt, nach weniger Iterationsschritten bereits genügend genaue Schätzungen zu ermitteln. Das Vortrainieren kann beispielsweise derart durchgeführt werden, dass für ein Linsensystem oder eine Mehrzahl von Linsensystemen jeweils verschiedene erste Ausrichtungen auf einem Prüfstand angefahren werden und die entsprechenden ersten Eigenschaftswerte ermittelt werden. Die so ermittelten Paare von erster Ausrichtung und erstem Eigenschaftswert können dann als Trainingsdatensatz des ersten maschinellen Lernsystems zum Vortrainieren verwendet werden.

[0033] Ein Vortrainieren des ersten maschinellen Lernsystems kann auch ein Reduzieren (engl. pruning) des ersten maschinellen Lernsystems umfassen, zum Beispiel ein Entfernen von trainierbaren Parametern des ersten maschinellen Lernsystems. Die zu reduzierenden Parameter können insbesondere basierend auf einem Validierungsdatensatz ermittelt werden.

[0034] Vorzugsweise ist möglich, dass das erste maschinelle Lernsystem ein polynomielles Modell umfasst, welches ausgebildet ist, zu einer Ausrichtung eine Ausgabe zu ermitteln, die die Eigenschaft charakterisiert.

[0035] Das polynomielle Modell kann insbesondere ausgebildet sein bezüglich einer ersten Ausrichtung einen ersten Eigenschaftswert bzw. eine Mehrzahl von ersten Eigenschaftswerten zu schätzen. Das maschinelle Lernsystem kann auch mehrere polynomielle Modelle umfassen, insbesondere für jeden zu prädizierten ersten Eigenschaftswert ein polynomielles Modell. Der Vorteil einer Verwendung des polynomiellen Modells ist, dass das polynomielle Modell sehr schnell trainiert werden kann. Hierdurch reduziert sich die Zeit für die Ermittlung der Ausrichtung des Linsensystems weiter.

[0036] In einer bevorzugten Ausprägung des Verfahrens ist weiterhin möglich, dass eine Mehrzahl von ersten Ausrichtungen basierend auf einem Verfahren der Bayes'schen Optimierung (engl. Bayesian Optimization) in Schritt a. bereitgestellt wird.

[0037] Vorteilhafterweise kann so eine Mehrzahl von ersten Ausrichtungen ermittelt werden, die zumindest eine initiale Einschränkung geeigneter Ausrichtungen charakterisiert. Hierdurch konvergiert die Approximation des ersten maschinellen Lernsystems noch schneller und das Verfahren wird weiter beschleunigt.

[0038] Alternativ ist auch möglich, dass die erste Ausrichtung basierend auf einem zweiten maschinellen Lernsystem ermittelt wird, wobei das zweite maschinelle Lernsystem ausgebildet ist, basierend auf einer Ausrichtung eine Veränderung der Ausrichtung zu bestimmen, die zu einer geeigneteren Ausrichtung führt.

[0039] Es ist beispielsweise denkbar, dass eine vorläufige Ausrichtung zufällig bestimmt wird, die dann in vorzugsweise einer Mehrzahl von Iterationsschritten iterativ und basierend auf dem zweiten maschinellen Lernsystem verbessert wird. In jeder der Iterationen kann beispielsweise für die vorläufige Ausrichtung eine Veränderung mittels des zweiten maschinellen Lernsystems ermittelt werden, die vorläufige Ausrichtung gemäß der ermittelten Veränderung angepasst werden und die angepasste Ausrichtung als vorläufige Ausrichtung der nächsten Iteration bereitgestellt werden. Eine vorläufige Ausrichtung oder eine Mehrzahl der vorläufigen Ausrichtungen kann anschließend als erste Ausrichtung bzw. als Mehrzahl von ersten Ausrichtungen im Verfahren verwendet werden. Vorteilhafterweise wird bzw. werden die erste Ausrichtung bzw. die ersten Ausrichtungen bereits vor Durchführung des Verfahrens geeignet eingeschränkt, wodurch das Verfahren noch schneller konvergiert und so die Ausrichtung des Linsensystems noch schneller ermittelt werden kann.

[0040] Das zweite maschinelle Lernsystem kann insbesondere ein neuronales Netz umfassen, welches ausgebildet ist, zu einer Ausrichtung eine geeignete Veränderung zu präzisieren.

[0041] Vorzugsweise kann das zweite maschinelle Lernsystem mittels eines Verfahrens des verstärkenden Lernens (engl. Reinforcement Learning) trainiert werden.

[0042] Der Einsatz eines Reinforcement Learning Verfahrens bedingt, dass für das zweite maschinelle Lernsystem Zustände und Aktionen definiert werden. Als Zustand kann insbesondere eine Ausrichtung verwendet werden. Das zweite maschinelle Lernsystem kann daher ausgebildet sein, eine Ausrichtung zu verarbeiten. Alternativ oder zusätzlich ist auch möglich, dass der oder die für eine Ausrichtung ermittelten Eigenschaftswert bzw. Eigenschaftswerte als Zustand dienen. Die Aktion, die vom zweiten maschinellen Lernsystem ermittelt wird, kann insbesondere eine Veränderung sein, die angibt, wie eine dem maschinellen Lernsystem übergebene Ausrichtung geändert werden soll.

[0043] Zum Training mittels eines Reinforcement Learning Verfahrens wird eine Belohnungsfunktion (engl. reward function) verwendet. Die Belohnungsfunktion kann im Verfahren insbesondere über meh-

rere Aktionen des zweiten maschinellen Lernsystems hinweg eine kumulative Güte bezüglich jeweils ermittelter vorläufiger Ausrichtungen sein. Beispielsweise können zum Ermitteln von Trainingsdaten des zweiten maschinellen Lernsystems ausgehend von einer zufällig gewählten vorläufigen Ausrichtung eine Mehrzahl von weiteren vorläufigen Ausrichtungen ermittelt werden, indem in jeweils einem Iterationsschritt eine vorläufige Ausrichtung basierend auf einer vorherigen vorläufigen Ausrichtung ermittelt wird. Alternativ oder zusätzlich ist auch möglich, dass eine Mehrzahl von vorläufigen Ausrichtungen als Trainingsdaten des zweiten maschinellen Lernsystems verwendet werden, z.B. eine vorgebbare Anzahl von Ausrichtungen entlang eines Gitters im Raum der Ausrichtungen. Für die Ausrichtungen der Mehrzahl von vorläufigen Ausrichtungen kann dann jeweils auf einem Prüfstand ein entsprechender Eigenschaftswert ermittelt werden. Ferner kann für die so ermittelten Eigenschaftswerte ermittelt werden, wie weit sie von entsprechenden Grenzen eines vorgebbaren Wertebereichs des Eigenschaftswert entfernt liegen und gleichzeitig im Wertebereich liegen, wobei ein Abstand von den Grenzen als ein Gütemaß der jeweiligen vorläufigen Ausrichtung verstanden werden kann. Die Belohnung für die so ermittelte Mehrzahl von vorläufigen Ausrichtungen kann eine Summe der Gütemaße sein. Das zweite maschinelle Lernsystem kann anschließend vorzugsweise mittels eines Verfahrens der Richtliniengradienten (engl. policy gradients) trainiert werden.

[0044] Der Vorteil des Trainings des zweiten maschinellen Lernsystems ist, dass das zweite maschinelle Lernsystem derart trainiert wird, dass jede vom zweiten maschinellen Lernsystem ermittelte Veränderung eine bestmögliche Verbesserung einer entsprechenden vorläufigen Ausrichtung mit sich bringt. Hierdurch werden die erste Ausrichtung bzw. die ersten Ausrichtungen effektiv auf geeignete Werte eingeschränkt, wodurch eine anschließende Ermittlung der Ausrichtung des Linsensystems in noch kürzerer Zeit möglich ist.

[0045] Nachfolgend werden Ausführungsformen der Erfindung unter Bezugnahme auf die beiliegenden Zeichnungen näher erläutert. In den Zeichnungen zeigen:

Fig. 1 schematisch den Ablauf eines Verfahrens zur Ermittlung einer Ausrichtung einer Linse;

Fig. 2 schematisch eine Vorrichtung zur Ausführung des Verfahrens.

Beschreibung der Ausführungsbeispiele

[0046] **Fig. 1** zeigt ein Flussdiagramm, welches den Ablauf eines Verfahrens zur Ermittlung einer Ausrichtung (A) einer Linse charakterisiert. In einem ersten Schritt (101) des Verfahrens wird zunächst eine erste

Ausrichtung bereitgestellt. Die Ausrichtung kann beispielsweise basierend auf einem zweiten maschinellen Lernsystem bereitgestellt werden. Alternativ ist auch möglich, dass die erste Ausrichtung basierend auf möglichen numerischen Werten der Ausrichtung zufällig ermittelt wird. Zum Beispiel kann die Ausrichtung durch einen sechsdimensionalen Vektor charakterisiert werden, wobei zum Bereitstellen der ersten Ausrichtung ein sechsdimensionaler Zufallsvektor gezogen werden kann. Vorzugsweise können im ersten Schritt (101) auch mehrere erste Ausrichtungen bereitgestellt werden.

[0047] Für die erste Ausrichtung bzw. für die ersten Ausrichtungen wird in einem zweiten Schritt (102) jeweils ein erster Eigenschaftswert ermittelt. Alternativ ist auch möglich, dass für die erste Ausrichtung bzw. für die ersten Ausrichtungen mehrere erste Eigenschaftswerte ermittelt werden. Für eine erste Ausrichtung kann der erste Eigenschaftswert bzw. können die ersten Eigenschaftswerte wie folgt ermittelt werden: Zunächst wird das Linsensystem gemäß der ersten Ausrichtung ausgerichtet. Dann wird ein optisches Signal, z. B. ein Lichtsignal aus dem sichtbaren Bereich des Lichtes, durch das Linsensystem gesendet. Das optische Signal wird durch das Linsensystem gebrochen. Das so gebrochene optische Signal kann anschließend in einer Empfangseinheit empfangen werden. Die Empfangseinheit kann beispielsweise einen Bildsensor umfassen, mittels welchem das gebrochene optische Signal erfasst werden kann.

[0048] Basierend auf dem erfassten Signal wird dann in einem dritten Schritt (103) des Verfahrens (100) der erste Eigenschaftswert bzw. die ersten Eigenschaftswerte ermittelt. Ein erste Eigenschaftswert kann beispielsweise ein Maß einer Fokussierung, eine Stärke des gebrochenen Signals oder eine Position des gebrochenen Signals bzgl. des Bildsensors charakterisieren.

[0049] Falls mehrere erste Ausrichtungen im ersten Schritt (101) bereitgestellt werden, kann vorzugsweise jeweils ein erster Eigenschaftswert bzw. eine Mehrzahl von ersten Eigenschaftswerten für je eine erste Ausrichtung ermittelt werden.

[0050] Alle ermittelten Paare aus erster Ausrichtung und erstem Eigenschaftswert bzw. ersten Eigenschaftswerten werden in einem vierten Schritt (104) dann zum Trainieren eines ersten maschinellen Lernsystems verwendet. Das erste maschinelle Lernsystem umfasst vorzugsweise ein polynomielles Modell, welches eingerichtet ist, basierend auf einer ersten Ausrichtung den entsprechenden ersten Eigenschaftswert zu präzisieren. Das polynomielle Modell kann vorzugsweise in einem dem Verfahren (100) vorgelagerten Vortraining vortrainiert werden. Das Vortraining kann insbesondere ein Anpassen

der Koeffizienten des polynomiellen Modells derart umfassen, dass ein geeigneter Grad des polynomiellen Modells gewählt wird. Insbesondere kann dies mittels einer Kreuzvalidierung geschehen. Das vorzugsweise vortrainierte polynomielle Modell kann dann basierend auf den Paaren verfeinert werden.

[0051] Falls mehrere erste Eigenschaftswerte für eine Ausrichtung vom ersten maschinellen Lernsystem präzisiert werden sollen, kann das polynomielle Modell auch ausgebildet sein alle ersten Eigenschaftswerte zu präzisieren. Alternativ ist auch möglich, dass das erste maschinelle Lernsystem für die Prädiktion jeweils eines ersten Eigenschaftswerts ein eigenes polynomielles Modell umfasst.

[0052] In einem fünften Schritt (105) wird dann basierend auf dem im vierten Schritt (104) trainierten ersten maschinellen Lernsystem eine zweite Ausrichtung ermittelt. Hierzu kann vorzugsweise ein Optimierungsproblem derart gelöst werden, dass der für die zweite Ausrichtung durch das erste maschinelle Lernsystem geschätzte Eigenschaftswert innerhalb eines vorgebbaren Wertebereichs liegt. Der vorgebbare Werte kann insbesondere durch eine untere und/oder eine obere Grenze charakterisiert werden, wobei eine Zielfunktion der Optimierung vorzugsweise einen Abstand des geschätzten Eigenschaftswerts zu der oberen und/oder zu der unteren Grenze charakterisiert. Das Ziel der Optimierung kann insbesondere derart verstanden werden, dass die zweite Ausrichtung derart ermittelt wird, dass der zur zweiten Ausrichtung geschätzte Eigenschaftswert einen größtmöglichen Abstand zur unteren und/oder zur oberen Grenze hat. Zur Lösung des Optimierungsproblems können insbesondere bekannte Verfahren aus dem Bereich der nichtlinearen Optimierung verwendet werden, beispielsweise Verfahren der nichtlinearen Programmierung.

[0053] In einem sechsten Schritt (106) wird das Linsensystem dann entsprechend der zweiten Ausrichtung ausgerichtet. Anschließend wird ein optisches Signal durch das Linsensystem gesendet und ein gebrochenes optisches Signal ermittelt.

[0054] Für das so ermittelte gebrochene optische Signal kann in einem siebten Schritt (107) des Verfahrens (100) wie für die ersten Ausrichtungen ein Eigenschaftswert ermittelt werden. Dieser Eigenschaftswert kann dann als zweiter Eigenschaftswert bereitgestellt werden. Es kann dann überprüft werden, ob der zweite Eigenschaftswert innerhalb des vorgebbaren Wertebereichs liegt. Falls dies der Fall ist, kann die zweite Ausrichtung als Ausrichtung (A) des Linsensystems bereitgestellt werden und das Verfahren beendet werden.

[0055] Falls der zweite Eigenschaftswert nicht innerhalb des vorgebbaren Wertebereichs liegt, können

insbesondere die Schritte vier (104) bis sieben (107) des Verfahrens (100) wiederholt werden. Vorzugsweise kann dabei das Paar aus zweiter Ausrichtung und zweitem Eigenschaftswert mit in der Trainingsmenge als weitere erste Ausrichtung und weiterer erster Eigenschaftswert bereitgestellt werden. Die Schritte vier (104) bis sieben (107) des Verfahrens (100) können insbesondere iterativ so lange wiederholt werden, bis der zweite Eigenschaftswert innerhalb des vorgebbaren Wertebereichs liegt.

[0056] Es kann auch vorkommen, dass das Verfahren, bedingt durch physikalische Gegebenheiten oder eine ungeeignete erste Ausrichtung, nicht in der Lage ist eine Ausrichtung zu ermitteln, sodass der erste Eigenschaftswert bzw. die ersten Eigenschaftswerte innerhalb ihres jeweils vorgebbaren Wertebereichs liegen. In diesem Fall kann das Verfahren nach einer vorgebbaren Anzahl von Iterationsschritten abgebrochen werden. Die vorgebbare Anzahl von Iterationsschritten kann insbesondere basierend auf einer zu erwartenden Anzahl von Iterationsschritten definiert werden, wobei die zu erwartende Anzahl eine Anzahl von Schritten charakterisiert, nach der das Verfahren typischerweise eine Ausrichtung bestimmt hat, sodass der erste Eigenschaftswert bzw. die ersten Eigenschaftswerte im jeweils vorgebbaren Wertebereich liegen. Die vorgebbare Anzahl von Iterationsschritten kann beispielsweise die doppelte Anzahl der zu erwartenden Anzahl von Iterationsschritten sein. Wahlweise kann das Verfahren auch für ein Linsensystem mit einer neuen ersten Ausrichtung neu gestartet werden, falls die vorgebbare Anzahl von Iterationsschritten erreicht oder überschritten wurde.

[0057] Fig. 2 zeigt eine Vorrichtung (200), welche eingerichtet ist das Verfahren (100) durchzuführen. Die Vorrichtung (200) umfasst eine Steuereinheit (40), welche eingerichtet ist, die Schritte des Verfahrens (100) durchzuführen. Die Steuereinheit (40) steuert einen Aktor (10), der das Linsensystem (L) gemäß einer vorgebbaren Ausrichtung ausrichten kann. Der Aktor (10) kann insbesondere ein Motor sein, der das Linsensystem (L) mechanisch ausrichten kann.

[0058] Zur Ermittlung eines Eigenschaftswerts bezüglich einer Ausrichtung kann die Steuereinheit (40) den Aktor (10) derart ansteuern, dass das Linsensystem (L) gemäß der Ausrichtung ausgerichtet wird. Anschließend kann die Steuereinheit (40) eine Entsendeeinheit (U1) derart ansteuern, dass die Entsendeeinheit ein optisches Signal (E) aussendet. Das optische Signal (E) wird am Linsensystem (L) gebrochen und ein so ermitteltes gebrochenes optisches Signal (G) in einer Empfangseinheit (U2) empfangen. Die Empfangseinheit (U2) kann vorzugsweise einen Bildsensor umfassen, mittels welchem

das gebrochene optische Signal (G) gemessen werden kann.

[0059] Das in der Empfangseinheit (U2) empfangene Signal (G) kann dann ausgewertet werden, um den Eigenschaftswert zu ermitteln. Der so ermittelte Eigenschaftswert kann dann zurück an die Steuereinheit (40) übermittelt werden. Alternativ ist auch möglich, dass eine Messung des Bildsensors selber an die Steuereinheit (40) übermittelt wird und anschließend die Steuereinheit (40) den Eigenschaftswert ermittelt.

[0060] In weiteren bevorzugten Ausführungsformen umfasst die Steuereinheit (40) zumindest einen Prozessor (45) und zumindest ein maschinenlesbares Speichermedium (46), auf dem Anweisungen gespeichert sind, die dann, wenn sie auf dem zumindest einen Prozessor (45) ausgeführt werden, die Steuereinheit (40) veranlassen, das Verfahren (100) auszuführen.

[0061] Der Begriff „Computer“ umfasst beliebige Geräte zur Abarbeitung vorgegebener Rechenvorschriften. Diese Rechenvorschriften können in Form von Software vorliegen, oder in Form von Hardware, oder auch in einer Mischform aus Software und Hardware.

[0062] Im Allgemeinen kann eine Mehrzahl als indiziert verstanden werden, d.h. jedem Element der Mehrzahl wird ein eindeutiger Index zugewiesen, vorzugsweise durch Zuweisung aufeinanderfolgender Ganzzahlen an die in der Mehrzahl enthaltenen Elemente. Vorzugsweise, wenn eine Mehrzahl N Elemente umfasst, wobei N die Anzahl der Elemente in der Mehrzahl ist, werden den Elementen die ganzen Zahlen von 1 bis N zugewiesen.

Patentansprüche

1. Verfahren (100) zum Ermitteln einer Ausrichtung (A) eines Linsensystems (L) umfassend die Schritte:
 - a. Ausrichten (101) des Linsensystems (L) gemäß einer bereitgestellten ersten Ausrichtung;
 - b. Ermitteln (102) eines ersten gebrochenen optischen Signals (G), wobei das erste gebrochene optische Signal (G) durch eine Brechung eines ersten ausgesendeten optischen Signals (E) an dem gemäß der ersten Ausrichtung ausgerichteten Linsensystems (L) ermittelt wird;
 - c. Ermitteln (103) eines ersten Eigenschaftswerts, wobei der erste Eigenschaftswert eine Eigenschaft des ersten gebrochenen optischen Signals (G) charakterisiert;
 - d. Trainieren (104) eines ersten maschinellen Lernsystems abhängig von der ersten Ausrichtung und dem ermittelten ersten Eigenschaftswert, wobei das maschinelle Lernsystem ausgebildet ist, zu

einer Ausrichtung eine Ausgabe zu ermitteln, die die Eigenschaft der Ausrichtung charakterisiert;
 e. Ermitteln der Ausrichtung (A) des Linsensystems (L) basierend auf einer Ausgabe des ersten maschinellen Lernsystems.

2. Verfahren (100) nach Anspruch 1, wobei das erste maschinelle Lernsystem in einem dem Verfahren (100) vorgelagerten Schritt vortrainiert wird.

3. Verfahren (100) nach Anspruch 1 oder 2, wobei das Ermitteln der Ausrichtung (A) des Linsensystems (L) basierend auf der Ausgabe des ersten maschinellen Lernsystems folgende Schritte umfasst:

f. Ermitteln (105) einer zweiten Ausrichtung derart, dass eine für die zweite Ausrichtung ermittelte Ausgabe des ersten maschinellen Lernsystems in einem vorgebbaren Wertebereich liegt;

g. Ermitteln (106) eines zweiten gebrochenen optischen Signals (G), wobei das zweite gebrochene optische Signal (G) durch eine Brechung eines zweiten ausgesendeten optischen Signals (E) an dem gemäß der zweiten Ausrichtung ausgerichteten Linsensystems (L) ermittelt wird;

h. Ermitteln (107) eines zweiten Eigenschaftswerts, wobei der zweite Eigenschaftswert die Eigenschaft des zweiten gebrochenen optischen Signals (G) charakterisiert;

i. Falls der für die zweite Ausrichtung zweite Eigenschaftswert nicht in einem für den zweiten Eigenschaftswert vorgebbaren Wertebereich liegt, wiederholen der Schritte d., f., g. und h., wobei die zweite Ausrichtung als zusätzliche erste Ausrichtung zum Trainieren des ersten maschinellen Lernsystems verwendet wird;

Andernfalls bereitstellen der zweiten Ausrichtung als Ausrichtung (A) des Linsensystems (L).

4. Verfahren (100) nach Anspruch 3, wobei die zweite Ausrichtung basierend auf einer Optimierung ermittelt wird, wobei eine Nebenbedingung der Optimierung ein Einhalten zumindest einer Grenze des vorgebbaren Wertebereichs charakterisiert.

5. Verfahren (100) nach einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei das erste maschinelle Lernsystem ein polynomielles Modell umfasst, welches ausgebildet ist, zu einer Ausrichtung eine Ausgabe zu ermitteln, die die Eigenschaft charakterisiert.

6. Verfahren (100) nach einem der Ansprüche 1 bis 5, wobei die erste Ausrichtung basierend auf einem Verfahren der Bayes'schen Optimierung (engl. Bayesian Optimization) bereitgestellt wird.

7. Verfahren (100) nach einem der Ansprüche 1 bis 5, wobei die erste Ausrichtung basierend auf einem zweiten maschinellen Lernsystem ermittelt wird, wobei das zweite maschinelle Lernsystem aus-

gebildet ist, basierend auf einer Ausrichtung eine Veränderung der Ausrichtung zu bestimmen.

8. Verfahren (100) nach Anspruch 7, wobei das zweite maschinelle Lernsystem mittels eines Verfahrens des verstärkenden Lernens (engl. Reinforcement Learning) trainiert wird.

9. Verfahren (100) nach einem der Ansprüche 1 bis 8, wobei das Linsensystem (L) Teil eines optischen Sensors ist.

10. Vorrichtung (200) zum Ausrichten eines Linsensystems (L), wobei die Vorrichtung (200) ausgebildet ist, das Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9 durchzuführen.

11. Computerprogramm, welches eingerichtet ist, das Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9 auszuführen, wenn es durch einen Prozessor (45) ausgeführt wird.

12. Maschinenlesbares Speichermedium (46), auf dem das Computerprogramm nach Anspruch 11 gespeichert ist.

Es folgen 2 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

100 ~

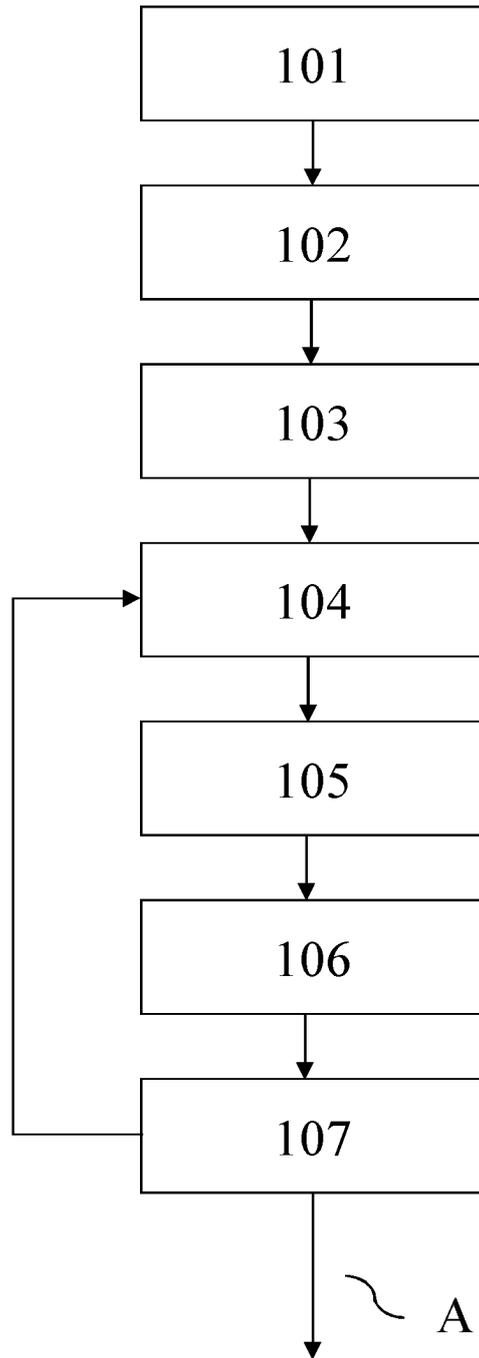


Fig. 1

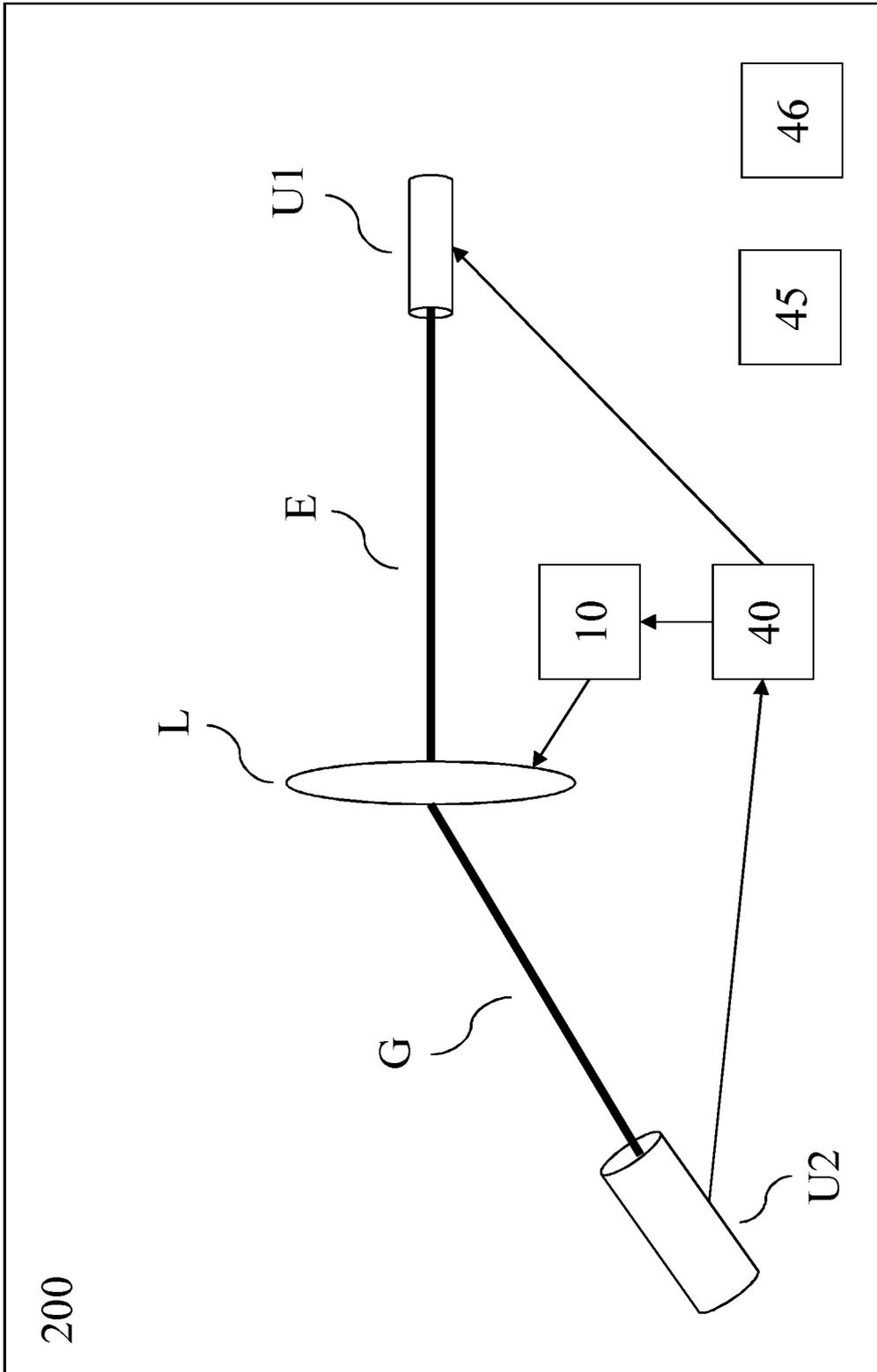


Fig. 2