

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

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
03. Oktober 2024 (03.10.2024)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2024/200136 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:

G06N 3/09 (2023.01) G06N 3/0464 (2023.01)
G06N 3/047 (2023.01) G06N 3/0475 (2023.01)
G06N 3/044 (2023.01) G06N 3/0499 (2023.01)
G06N 3/045 (2023.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2024/057366

(22) Internationales Anmeldedatum:
20. März 2024 (20.03.2024)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2023 203 027.6
31. März 2023 (31.03.2023) DE

(71) Anmelder: CONTINENTAL AUTOMOTIVE TECHNOLOGIES GMBH [DE/DE]; Continental-Plaza 1, 30175 Hannover (DE). CONTINENTAL AUTONOMOUS MOBILITY GERMANY GMBH [DE/DE]; Ringlerstraße 17, 85057 Ingolstadt (DE).

(72) Erfinder: KASSEM SBEYTI, Moussa; c/o co-pace GmbH, Continental-Plaza 1, 30175 Hannover (DE). KARG, Michelle; c/o ADC Automotive Distance Control Systems GmbH, Peter-Dornier-Straße 10, 88131 Lindau (DE). WIRTH, Christian; c/o Continental Automotive Technologies GmbH, Continental-Plaza 1, 30175 Hannover (DE).

(74) Anwalt: CONTINENTAL CORPORATION; c/o Continental Automotive Technologies GmbH, Intellectual Property, Nordostpark 30, 90411 Nürnberg (DE).

(54) Title: CALIBRATING THE UNCERTAINTY OF AN OBJECT DETECTOR

(54) Bezeichnung: KALIBRIERUNG DER UNSICHERHEIT EINES OBJEKTDETEKTORS

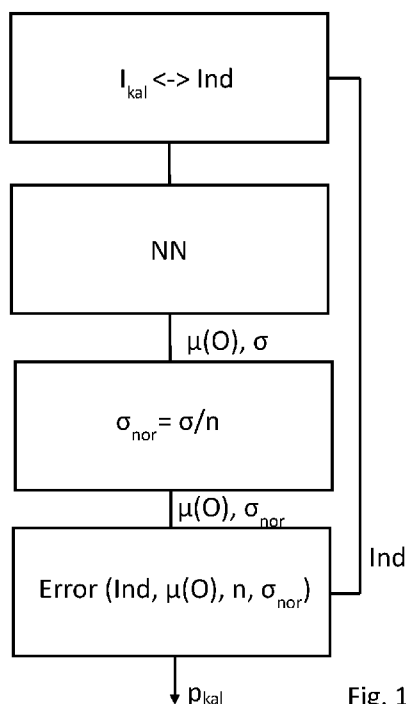


Fig. 1

(57) Abstract: The invention relates to a method, in particular a computer-implemented method, for calibrating at least one uncertainty (σ) of a neural network (NN) of an object detector, which neural network (NN) is designed to output, depending on input data, at least one statement (μ) about an object (O) and at least one uncertainty (μ) associated with the statement (μ). The invention also relates to a method for detecting at least one object by means of an object detector comprising a neural network calibrated according to the invention, a computer program, and a computer program product. In the method, calibration data (I_{kal}) for the neural network (NN) and an indication (Ind) regarding the uncertainty (σ) are provided, and a statement (μ) and the associated uncertainty (σ) are determined by processing the calibration data (I_{kal}) by means of the neural network (NN) in accordance with parameters for the neural network (NN). Subsequently, the normalised, generated uncertainty (σ_{nor}) is compared with a similarly and identically normalised deviation of the statement (μ) of the indication (Ind) using at least one error function (Error), wherein at least one calibration parameter (p_{kal}) is taken into account for the error function (Error), and the calibration parameter (p_{kal}) is optimised based on said comparison.

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren, insbesondere computer-implementiertes Verfahren, zur Kalibrierung von zumindest einer Unsicherheit (σ) eines neuronalen Netzes (NN) eines Objektdetektors, welches neuronale Netz (NN) dazu ausgestaltet ist, in Abhängigkeit von Eingangsdaten zumindest eine Aussage (μ) über ein Objekt (O) und zumindest eine der Aussage (μ) zugeordnete Unsicherheit (μ) auszugeben. Die Erfindung betrifft ferner ein Verfahren zur Detektion von zumindest einem Objekt mittels eines Objektdetektors umfassend ein erfindungsgemäß kalibriertes neuronales Netz, ein Computerprogramm und ein Computerprogrammprodukt. Bei dem Verfahren werden Kalibrierdaten (I_{kal}) für das neuronale Netz (NN) und eine Indikation (Ind) bezüglich der Unsicherheit (σ) bereitgestellt und es wird durch Verarbeitung der Kalibrierdaten (I_{kal}) mittels des neuronalen Netzes (NN) in Übereinstimmung mit Parametern für das neuronale Netz (NN)



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

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

Veröffentlicht:

— mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)

eine Aussage (μ) und zugehörigen Unsicherheit (σ) ermittelt. Dann wird die normierte, erzeugte Unsicherheit (σ_{nor}) mit einer ebenfalls und identisch normierten Abweichung der Aussage (μ) der Indikation (Ind) unter Verwendung von zumindest einer Fehlerfunktion (Error) verglichen, wobei für die Fehlerfunktion (Error) zumindest ein Kalibrierungsparameters (p_{kai}) berücksichtigt wird, und der Kalibrierungsparameter (p_{kai}) wird auf Grundlage des Vergleichs optimiert.

Beschreibung

Kalibrierung der Unsicherheit eines Objektdetektors

- 5 Die vorliegende Erfindung betrifft ein, insbesondere computer-implementiertes, Verfahren zur Kalibrierung von zumindest einer Unsicherheit eines neuronalen Netzes eines Objektdetektors, ein, insbesondere computer-implementiertes, Verfahren zur Detektion zumindest eines Objektes mittels eines Objektdetektors umfassend ein erfindungsgemäß kalibriertes neuronales Netz, ein
- 10 Computerprogramm zur Ausführung des erfindungsgemäßen Verfahrens sowie ein Computerprogrammprodukt, auf welchem das erfindungsgemäße Verfahren gespeichert ist.

- Bei der Verwendung von neuronalen Netzen zur Regression oder Klassifikation ist
- 15 es in vielen Fällen wichtig, neben dem jeweiligen Vorhersageergebnis auch eine mit der jeweiligen Vorhersage verbundene Unsicherheit zu ermitteln. Dies betrifft insbesondere sicherheitskritische Situationen.

- Ein prominentes Beispiel stellen in diesem Zusammenhang
- 20 Fahrerassistenzsysteme (engl. advanced driver assistance system, ADAS) dar, bei denen neuronale Netze beispielsweise für die Verarbeitung von Input-Daten verschiedener Sensoren, beispielsweise Radar-, Lidar- oder Ultraschallsensoren, sowie auch Kameras, verwendet werden können. Von den ADAS-Systemen typischerweise bereitgestellte ADAS-Funktionen dienen einerseits zur
- 25 Unterstützung des Fahrers, während die Kontrolle über das Fahren des Fahrzeugs weiterhin beim Fahrer verbleibt, oder es kann in Abhängigkeit des Automatisierungsgrades ein vollständig automatisiertes Fahren realisiert werden. Beispiele für ADAS-Funktionen sind verschiedene Verfahren zum Erkennen von
- 30 Fahrbahnbegrenzungen und/oder zum Halten des Fahrzeugs in einer Spur, Verfahren zum Erkennen von Regen auf der Windschutzscheibe, oder auch Verfahren zur Unterstützung oder Durchführung eines Parkvorgangs.

Die jeweils verwendeten Eingangsdaten von den jeweils verwendeten ADAS-Sensoren können mit unterschiedlichsten Problemen behaftet sein, wie beispielsweise unzureichende Sensorauflösung, problematische Wetterbedingungen oder selten auftretende Szenarien. Dazu kommt, dass ggf.

- 5 bestimmte Objekte durch andere Objekte verdeckt und damit in den Eingangsdaten nicht sichtbar sein können. Für alle diese Fälle wäre eine Kenntnis der Unsicherheit der jeweiligen Vorhersage von zentraler Bedeutung.

- So ist aus der DE102020215860A1 ein Verfahren zum Korrigieren von
10 Eingangs-Bilddaten einer Mehrzahl von Kameras eines Rundumsichtsystems, die durch Regen, Lichteinfall und/oder Schmutz beeinträchtigt sind, bekannt geworden, bei dem von den Kameras erfasst Eingangsbilddaten von einem trainierten neuronalen Netz verarbeitet werden, welches auch eine Unsicherheit für die ermittelte Bildkorrektur ausgibt. Ein ähnliches Verfahren zum Korrigieren von
15 Eingangs-Bilddaten einer Kamera ist aus DE102020215859A1 bekannt geworden.

- Neuronale Netze, insbesondere solche, welche einer Regressionsaufgabe dienen, d.h. Netze, welche kontinuierliche Werte als Vorhersageergebnis ausgeben, neigen allerdings dazu, dass zugehörige Unsicherheiten ungenau und damit einhergehend
20 nicht direkt nutzbar sind. Zur Erhöhung der Genauigkeit bedarf es somit einer Kalibration bzw. Justierung der Unsicherheiten. Dies betrifft unter anderem auch die Objektlokalisierung mittels eines Objektdetektors, welcher einer etwaigen Objektklassifikation vorgelagert ist. Hier sind keine oder wenige Informationen zur Konfidenz der jeweiligen Vorhersage, d.h. zu deren Zuverlässigkeit, verfügbar.

25

- Aus DE102019217300A1 ist beispielsweise ein Verfahren zum Trainieren eines neuronalen Netzes zur Ausgabe einer Vorhersage und zugeordneten Unsicherheit bekannt geworden, bei welchem die ermittelte Unsicherheit durch die Verlustfunktion berücksichtigt wird. Auf diese Weise kann sichergestellt werden,
30 dass das Netz wohlkalibrierte Unsicherheiten ermittelt, wenn die Verteilung der zu verarbeitenden Daten der Verteilung der Trainingsdaten ähnelt.

Aus „Accurate Uncertainties for Deep Learning Using Calibrated Regression“ von V. Kuleshov et al., erschienen auf arXiv:1807.00263, 2018 (DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1807.00263>) ist ein Verfahren speziell zur Kalibration von Unsicherheiten bei einer Regression bekannt geworden. Das Verfahren birgt
5 allerdings die Gefahr eines Over-fittings. Zudem basiert es auf einer isotonischen Regression und ist somit vergleichsweise rechenaufwendig.

Ein weiteres Verfahren zur Kalibration von Unsicherheiten ist in „Well-calibrated Model Uncertainty with Temperature Scaling for Dropout Variational Inference“ von
10 M-H. Laves et al., erschienen auf arXiv:1909.13550, 2019 (DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1909.13550>) beschrieben worden. Dieses Verfahren ist weniger rechenintensiv, allerdings kann es sehr empfindlich gegenüber Ausreißern und falsch zugeordneten Variablen sein, was für reale Datensätze besonders relevant werden kann.

15 Es wäre demnach wünschenswert, eine Möglichkeit zur Kalibration von Unsicherheiten für die Objekterkennung bereitzustellen, welche sich durch eine hohe Genauigkeit und eine hohe Recheneffizienz auszeichnet.

20 Somit liegt die der Erfindung zugrunde liegende Aufgabe darin, eine Möglichkeit zur Kalibration von Unsicherheiten bereitzustellen, welche sich durch eine hohe Genauigkeit und eine hohe Recheneffizienz auszeichnet.

Die der Erfindung zugrunde liegende Aufgabe wird gelöst durch das Verfahren nach
25 Anspruch 1, das Verfahren nach Anspruch 10, das Computerprogramm nach Anspruch 13 und das Computerprogrammprodukt nach Anspruch 14.

Hinsichtlich des Verfahrens wird die der Erfindung zugrunde liegende Aufgabe
30 gelöst durch ein Verfahren, insbesondere ein computer-implementiertes Verfahren, zur Kalibrierung von zumindest einer Unsicherheit eines neuronalen Netzes eines Objektdetektors, welches neuronale Netz dazu ausgestaltet ist, in Abhängigkeit von Eingangsdaten zumindest eine Aussage über ein Objekt und zumindest eine der

Aussage zugeordnete Unsicherheit auszugeben. Das Verfahren umfasst die folgenden Verfahrensschritte:

- Bereitstellen von Kalibrierdaten für das neuronale Netz,
- Bereitstellen einer Indikation bezüglich der Unsicherheit betreffend die Aussage für alle Kalibrierdaten,
- Erzeugen einer Aussage und zugehörigen Unsicherheit für alle Kalibrierdaten durch Verarbeitung der Kalibrierdaten mittels des neuronalen Netzes in Übereinstimmung mit Parametern für das neuronale Netz,
- Normieren der erzeugten Unsicherheit für die zumindest eine Aussage,
- Vergleichen der normierten, erzeugten Unsicherheit mit einer ebenfalls und identisch normierten Abweichung der Aussage von der Indikation unter Verwendung von zumindest einer Fehlerfunktion, wobei für die Fehlerfunktion zumindest ein Kalibrierungsparameters berücksichtigt wird, und
- Optimieren des Kalibrierungsparameters auf Grundlage des Vergleichs.

Erfindungsgemäß wird die Kalibration der Unsicherheiten von dem Training des neuronalen Netzes getrennt und ist diesem nachgelagert. Die Kalibration der Unsicherheiten erfolgt anhand eines, insbesondere separaten, Kalibrierdatensatzes.

In einem Objektdetektor werden Objekte zunächst lokalisiert und anschließend klassifiziert. Der Objektdetektor umfasst somit eine Lokalisierungs- und eine Klassifikationseinheit. Die vorliegende Erfindung betrifft insbesondere die Lokalisierung von Objekten und die damit einhergehend ermittelten Unsicherheiten hinsichtlich der Objektlokalisierung.

Das erfindungsgemäße Vorgehen bietet den Vorteil einer hohen Genauigkeit bei gleichzeitiger Ressourceneffizienz. Damit ist es besonders geeignet für den Einsatz in Zusammenhang mit eingebetteten Systemen, wie sie beispielsweise auch bei Fahrerassistenzsystemen häufig verwendet werden. Darüber hinaus hat die Normalisierung der erzeugten Unsicherheiten und der Abweichung der Aussage

von der Indikation, d.h. der Ground Truth, den vorteilhaften Effekt, dass die Unsicherheiten für jede Aussage unabhängig von der jeweiligen Objektgröße und Objektklasse korrekt kalibriert werden können.

- 5 Gemäß einer vorteilhaften Ausgestaltung handelt es sich bei dem neuronalen Netz um ein trainiertes neuronales Netz. Das erfindungsgemäße Verfahren kann Teil eines Trainingsverfahrens zum Trainieren des neuronalen Netzes sein oder es kann sich um ein separat vom Trainingsverfahren ablaufendes eigenes Verfahren handeln.

10

Bei dem neuronalen Netz handelt es sich beispielsweise um ein faltendes neuronales Netz (engl. convolutional neural network, CNN), um ein Mixture-Density Netz, ein Transformer-Netz, ein rekurrentes neuronales Netz, um ein mehrschichtiges Perzeptron oder um ein generatives, adversiales Netz.

15

In einer Ausgestaltung handelt es sich bei dem Objektdetektor um einen ankerbasierten, einen zentralpunkt-basierten, einen mehrstufigen, einen einstufigen, einen CNN-basierten oder einen Transformer-basierten Objektdetektor. Beispielsweise kann es sich um einen YOLO-Objektdetektor, einen
20 SSD-Objektdetektor oder einen EfficientDet Objektdetektor.

25

Es ist von Vorteil, wenn es sich bei der Aussage um eine Aussage über eine Position eines Objektes, um eine Aussage über eine Eigenschaft des Objektes oder um eine Aussage über eine geometrische Größe des Objektes handelt. Die Position
des Objekts kann beispielsweise anhand von einer oder mehreren Koordinaten für das Objekt angegeben sein. Eine Eigenschaft des Objekts ist beispielsweise ein Objekttyp und eine geometrische Größe betrifft beispielsweise dessen geometrische Abmessungen, seine Größe, Querschnittsfläche oder ein Volumen des Objekts. Es sei darauf verwiesen, dass aber auch andere Aussagen über das
30 Objekt getroffen werden können und unter die vorliegende Erfindung fallen.

Werden mehrere Aussagen über eine Objektklasse und/oder Aussagen über mehrere Objektklassen ausgegeben, so erfolgt die Kalibration vorzugsweise

separat für jede Objektklasse und/oder für jede Aussage. Im Falle, dass es sich bei der Aussage um eine Aussage über die Position eines Objekts handelt, welche durch mehrere Koordinaten bestimmt ist, so kann beispielsweise jede Koordinate als eine Aussage betrachtet werden. Es ist aber auch denkbar, sämtliche

5 Koordinaten zu einer Aussage zusammenzufassen.

Gemäß einer vorteilhaften Ausgestaltung werden die Unsicherheit und die Abweichung der Aussage von der Indikation auf eine geometrische Größe des Objekts, insbesondere eine Länge, Breite, Höhe, Fläche oder ein Volumen des

10 Objekts, normiert. Dies hat den vorteilhaften Effekt, dass unterschiedliche Objektgrößen, Seitenverhältnisse, geometrische Abmessungen und Größen von Bounding-Boxen für die Kalibration berücksichtigt werden können. So kann z. B. vermieden werden, dass größere Objekte oder Bounding-Boxen einen negativen Einfluss auf die Kalibration für kleinere Objekte bzw. Bounding-Boxen haben.

15 Es ist ferner von Vorteil, wenn die Parameter des Modells mittels eines Optimierungsverfahrens, insbesondere mittels einer isotonischen Regression, eines Gradientenverfahrens, eines Platt Scaling Verfahrens oder anhand eines Histogram Binning Ansatzes optimiert werden.

20 In einer Ausgestaltung handelt es sich bei der Fehlerfunktion um eine Distanzmetrik, insbesondere um ein mittleres Abweichungsquadrat oder um eine absolute Abweichung. Eine Distanzmetrik ist eine Metrik bzw. Abstandsfunktion für einen metrischen Raum, welche zwei Elementen bzw. Punkten eines Raumes

25 einen nichtnegativen, reellen Wert zuordnet. Eine Distanzmetrik ist symmetrisch und sie genügt der Dreiecksungleichung. Die Erfindung ist aber auch in Zusammenhang mit anderen Fehlerfunktionen einsetzbar.

Dann ist es zudem von Vorteil, wenn der Kalibrationsparameter eine Skalierung

30 beinhaltet, welche insbesondere für die Fehlerfunktion berücksichtigt wird. Bei der Skalierung kann es sich um einen oder mehrere konstante Skalierungsfaktoren, um einen Skalierungsvektor oder um eine Skalierungsmatrix handeln. Die Skalierung kann nach Abschluss der Kalibration für alle vorhergesagten Unsicherheiten

berücksichtigt werden. Mittels der Skalierung kann schnell, effektiv und präzise eine Kalibration für alle vorgesagten Unsicherheiten erreicht werden.

5 Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung beinhaltet, dass eine Kalibriervorschrift ermittelt wird, mittels welcher zumindest eine mittels des neuronalen Netzes ermittelte Unsicherheit kalibriert wird. Die Kalibriervorschrift wird also insbesondere bei Verwendung des neuronalen Netzes zum Ausgeben der Aussage und der Unsicherheit berücksichtigt. Die Vorschrift berücksichtigt den zumindest einen Kalibrierungsparameter und kann eine Multiplikation mit einem skalaren Wert
10 beinhalten oder auch ein Modell.

Die der Erfindung zugrunde liegende Aufgabe wird außerdem gelöst durch ein Verfahren, insbesondere ein computer-implementiertes Verfahren, zur Detektion
15 zumindest eines Objektes mittels eines Objektdetektors umfassend ein erfindungsgemäß kalibriertes neuronales Netz. Das Verfahren umfasst die folgenden Verfahrensschritte:

- Erfassen von Eingangsdaten umfassend zumindest eine Information über das zumindest eine Objekt,
- Bereitstellen der Eingangsdaten als Input für das kalibrierte neuronale
20 Netz, welches neuronale Netz dazu ausgestaltet ist, anhand des Inputs zumindest eine Aussage über das Objekt und zumindest eine der Aussage zugeordnete Unsicherheit auszugeben,
- Normieren der Unsicherheit,
- Kalibrieren der normierten Unsicherheit, und
25 - Ausgeben der Aussage und der kalibrierten, normierten Unsicherheit für die Aussage.

Die Eingangsdaten können mittels einem oder mehreren Sensoren erfasst werden. Für den Fall eines Fahrerassistenzsystems sind dies beispielsweise verschiedene
30 ADAS-Sensoren. Bei der Aussage über das Objekt handelt es sich insbesondere um eine Position des Objekts. Das Verfahren betrifft dann eine Objektklassifizierung. Die Unsicherheit wird vorzugsweise so normiert wie die erzeugten Unsicherheiten während der Durchführung des Kalibrationsverfahrens anhand der Kalibrierdaten.

Insbesondere wird die Unsicherheit auf eine geometrische Größe des Objekts normiert. Die Kalibration der Unsicherheit wiederum erfolgt bevorzugt anhand einer zuvor ermittelten Kalibriervorschrift.

- 5 In einer Ausgestaltung wird eine kalibrierte, absolute Unsicherheit ermittelt und ausgegeben. Zum Ermitteln der absoluten Unsicherheit kann die kalibrierte, normierte Unsicherheit mit der Normierung multipliziert werden.

- 10 Das erfindungsgemäße Verfahren zur Detektion zumindest eines Objektes mittels eines Objektdetektors findet bevorzugt Verwendung für Fahrerassistenzsysteme. Das Verfahren ist aber ebenfalls verwendbar in anderen Bereichen, beispielsweise in der Computer Vision, oder für medizinische, bildgebende Verfahren. Auch das Verfahren zur Kalibrierung von zumindest einer Unsicherheit eines neuronalen Netzes eines Objektdetektors wird bevorzugt in Zusammenhang mit einem
- 15 Fahrerassistenzsystem verwendet.

- Bei einer Objektdetektion mittels eines Objektdetektors in einem Fahrerassistenzsystem werden anhand von zumindest einem ADAS-Sensor, beispielsweise einer Kamera, Aussagen über zumindest ein Objekt, beispielsweise
- 20 über eine Position oder geometrische Größe des Objekts ermittelt. Bei dem Objekt kann es sich um einen weiteren Verkehrsteilnehmer in der Fahrzeugumgebung, ein Tier, eine Fahrbahnbegrenzung, einen Gegenstand in der Fahrzeugumgebung oder um ein Verkehrszeichen oder eine Ampel bzw. ein Lichtzeichen handeln. Neben der Aussage wird auch eine Unsicherheit für die getroffene Aussage ermittelt, kalibriert
- 25 und ausgegeben.

- Die der Erfindung zugrunde liegende Aufgabe wird ferner gelöst durch ein Computerprogramm mit Anweisungen, die, wenn das Computerprogramm von einem Computer ausgeführt wird, den Computer veranlassen, das
- 30 erfindungsgemäße Verfahren zur Kalibration zumindest einer Unsicherheit eines neuronalen Netzes oder das Verfahren zur Detektion zumindest eines Objekts mittels eines Objektdetektors, je nach einer der beschriebenen Ausgestaltungen,

auszuführen, sowie durch ein Computerprogrammprodukt, auf welchem das erfindungsgemäße Computerprogramm gespeichert ist.

Die Erfindung wird anhand der nachfolgenden Figuren näher erläutert. Es zeigt:

5

Fig. 1 eine erste vorteilhafte Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens, und

10

Fig. 2 eine Objektdetektion anhand eines erfindungsgemäß kalibrierten neuronalen Netzes.

In den Figuren werden gleiche Elemente jeweils mit demselben Bezugszeichen versehen.

15

Für die in Fig. 1 illustrierte vorteilhafte Ausgestaltung wird von einem vorab trainierten neuronalen Netz NN in einem Objektdetektor ausgegangen.

Das neuronale Netz NN dient zur Ermittlung einer Aussage μ über ein Objekt O und einer der Aussage zugehörigen Unsicherheit σ . Bei der Aussage handelt es sich hier um die Position des Objekts O.

20

Die von einem neuronalen Netz NN ausgegebenen Unsicherheiten σ sind typischerweise mit Fehlern behaftet und entsprechen nicht der tatsächlich vorliegenden Unsicherheit. Um eine präzise Vorhersage auch der Unsicherheit σ zu ermöglichen, bedarf es einer Kalibrierung der Unsicherheiten σ , welche anhand des erfindungsgemäßen Verfahrens vorgenommen werden kann. Nach der Kalibration ist die Unsicherheit σ probabilistisch interpretierbar, d.h. es können Aussagen getätigt werden wie z.B. dass der korrekter Wert mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% im prädizierten Unsicherheitsintervall liegt.

25

30

Zum Zweck der Kalibrierung werden zunächst Kalibrierdaten I_{kal} für das neuronale Netz NN sowie eine Indikation Ind für alle Kalibrierdaten I_{kal} bereitgestellt. Die Kalibrierdaten I_{kal} werden mittels des neuronalen Netzes verarbeitet und es wird eine Aussage μ und zugehörige Unsicherheit σ auf Basis der Kalibrierdaten I_{kal}

erzeugt. Die erzeugte Unsicherheit σ wird dann normiert und beispielsweise durch einen Normierungsfaktor n geteilt, d.h.

$$\sigma_{nor} = \frac{\sigma}{n}$$

- 5 Ebenfalls wird die Abweichung der Aussage μ von der Indikation Ind mit dem Normierungsfaktor n normiert. Die normierte, erzeugte Unsicherheit σ_{nor} wird dann unter Verwendung einer Fehlerfunktion $Error$ mit der normierten Abweichung der Aussage μ von Indikation Ind verglichen und mindestens ein Kalibrierungsparameter p_{kal} wird auf Grundlage des Vergleichs optimiert.

10

Für den Fall, dass es sich bei der Fehlerfunktion um eine Distanzmetrik handelt, für welche eine Skalierung s berücksichtigt wird und sofern es sich bei der Skalierung s um einen konstanten, skalaren Wert handelt, kann als Fehlerfunktion $Error$ eine Funktion auf Basis eines mittleren Abweichungsquadrats gewählt werden, welche

- 15 dann für N Detektionen beispielsweise gegeben ist durch

$$Error_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta_i - s\sigma_i)^2}$$

Alternativ kann eine Fehlerfunktion $Error$ auf Basis einer absoluten Abweichung
20 verwendet werden, welche wiederum gegeben ist durch

$$Error_{MA} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\Delta_i - s\sigma_i|$$

- 25 Dabei ist $\Delta = |Ind - \mu|$ die absolute Abweichung, d.h. die Differenz zwischen der Indikation Ind und der Vorhersage μ .

Es kann zudem eine Kalibriervorschrift KAL ermittelt werden, welche für die hier gezeigte Ausgestaltung bei der Objektlokalisierung in dem Objektdetektor verwendet werden kann, wie anhand von Fig. 2 illustriert.

- 5 Zur Lokalisierung von Objekten werden für die in Fig. 2 dargestellte Ausgestaltung zunächst mit einem oder mehreren ADAS-Sensoren Informationen über eine Fahrzeugumgebung und insbesondere über zumindest ein Objekt O in der Fahrzeugumgebung erfasst. Diese werden dem neuronalen Netz NN als Input zur Verfügung gestellt. Das neuronale Netz NN ist dazu ausgestaltet, anhand des
- 10 Inputs eine Aussage über die Position P des zumindest Objekts zu treffen und eine zur Position zugehörige Unsicherheit σ auszugeben. Neben der Position P des Objekts, welche beispielsweise durch seine Mittelpunktskoordinaten gegeben sein kann, kann auch eine Aussage über eine Größe des Objekts O getroffen werden, beispielsweise einer Länge, Breite, Höhe, Fläche oder eines Volumens des Objekts
- 15 O. Die mittels des Netzes NN ausgegebene Unsicherheit σ wird anschließend normiert σ_{nor} und anhand der Kalibriervorschrift KAL kalibriert. Das Ergebnis ist eine kalibrierte, normierte Unsicherheit $\sigma_{\text{kal,nor}}$, aus welcher auch eine kalibrierte, absolute Unsicherheit ermittelbar ist.

Patentansprüche

1. Verfahren, insbesondere computer-implementiertes Verfahren, zur
Kalibrierung von zumindest einer Unsicherheit (σ) eines neuronalen Netzes
(NN) eines Objektdetektors, welches neuronale Netz (NN) dazu ausgestaltet
ist, in Abhängigkeit von Eingangsdaten zumindest eine Aussage (μ) über ein
Objekt (O) und zumindest eine der Aussage (μ) zugeordnete Unsicherheit (μ)
auszugeben, umfassend die Verfahrensschritte:
- Bereitstellen von Kalibrierdaten (I_{kal}) für das neuronale Netz (NN),
 - Bereitstellen einer Indikation (Ind) bezüglich der Unsicherheit (σ)
betreffend die Aussage für alle Kalibrierdaten,
 - Erzeugen einer Aussage und zugehörigen Unsicherheit (σ) für alle
Kalibrierdaten (I_{kal}) durch Verarbeitung der Kalibrierdaten (I_{kal}) mittels des
neuronalen Netzes (NN) in Übereinstimmung mit Parametern für das
neuronale Netz (NN),
 - Normieren der erzeugten Unsicherheit (σ) für die zumindest eine
Aussage (μ),
 - Vergleichen der normierten, erzeugten Unsicherheit (σ_{nor}) mit einer
ebenfalls und identisch normierten Abweichung der Aussage (μ) der
Indikation (Ind) unter Verwendung von zumindest einer Fehlerfunktion
(Error), wobei für die Fehlerfunktion (Error) zumindest ein
Kalibrierungsparameters (p_{kal}) berücksichtigt wird, und
 - Optimieren des Kalibrierungsparameters (p_{kal}) auf Grundlage des
Vergleichs.
2. Verfahren nach Anspruch 1,
wobei es sich bei dem neuronalen Netz (NN) um ein trainiertes neuronales
Netz (NN) handelt.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2,
wobei es sich bei dem Objektdetektor um einen ankerbasierten, einen
zentralpunkt-basierten, einen mehrstufigen, einen einstufigen, einen
CNN-basierten oder einen Transformer-basierten Objektdetektor handelt.

4. Verfahren nach zumindest einem der vorherigen Ansprüche,
wobei es sich bei der Aussage (μ) um eine Aussage über eine Position (P),
eine Eigenschaft oder eine geometrische Größe des Objekts (O) handelt.
- 5 5. Verfahren nach zumindest einem der vorherigen Ansprüche,
wobei die Unsicherheit (σ) auf eine geometrische Größe des Objekts (O),
insbesondere eine Länge, Breite, Höhe, Fläche oder ein Volumen des
Objekts (O), normiert wird.
- 10 6. Verfahren nach zumindest einem der vorherigen Ansprüche,
wobei die Indikation (Ind) normiert wird, insbesondere wobei die Indikation
(Ind) auf eine geometrische Größe des Objekts (O) normiert wird.
- 15 7. Verfahren nach zumindest einem der vorherigen Ansprüche,
wobei die Parameter des Modells mittels eines Optimierungsverfahrens,
insbesondere mittels einer isotonischen Regression, eines
Gradientenverfahrens, eines Platt Scaling Verfahrens oder eines Histogram
Binning Verfahrens optimiert werden.
- 20 8. Verfahren nach zumindest einem der vorherigen Ansprüche,
wobei es sich bei der Fehlerfunktion (Error) um eine Distanzmetrik,
insbesondere um ein mittleres Abweichungsquadrat oder um eine absolute
Abweichung handelt.
- 25 9. Verfahren nach zumindest einem der vorherigen Ansprüche,
wobei eine Kalibriervorschrift (KAL) ermittelt wird, mittels welcher zumindest
eine mittels des neuronalen Netztes (NN) ermittelte Unsicherheit (σ)
kalibriert wird.
- 30 10. Verfahren, insbesondere computer-implementiertes Verfahren, zur
Detektion zumindest eines Objektes (O) mittels eines Objektdetektors
umfassend ein nach zumindest einem der vorherigen Ansprüche kalibriertes
neuronales Netz (NN), umfassend die Verfahrensschritte:

- Erfassen von Eingangsdaten (Input) umfassend zumindest eine Information über das zumindest eine Objekt (O),
- Bereitstellen der Eingangsdaten (Input) als Input für das kalibrierte neuronale Netz, welches neuronale Netz dazu (NN) ausgestaltet ist, anhand des Inputs zumindest eine Aussage (μ) über das Objekt (O) und zumindest eine der Aussage zugeordnete Unsicherheit (σ) auszugeben,
- Normieren der Unsicherheit (σ),
- Kalibrieren der normierten Unsicherheit (σ_{nor}), und
- Ausgeben der Aussage (μ) und der kalibrierten, normierten Unsicherheit ($\sigma_{\text{kal,nor}}$) für die Aussage (μ).

11. Verfahren nach Anspruch 10,

wobei eine kalibrierte, absolute Unsicherheit ermittelt und ausgegeben wird.

12. Verwendung des Verfahrens nach Anspruch 10 oder 11 oder des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 -9 für ein Fahrerassistenzsystem.

13. Computerprogramm mit Anweisungen, die, wenn das Computerprogramm von einem Computer ausgeführt wird, den Computer veranlassen, das Verfahren nach einem der Ansprüche 10 oder 11 oder das Verfahren nach einem der Ansprüche 1-9 auszuführen.

14. Computerprogrammprodukt, auf welchem das Computerprogramm nach Anspruch 13 gespeichert ist.

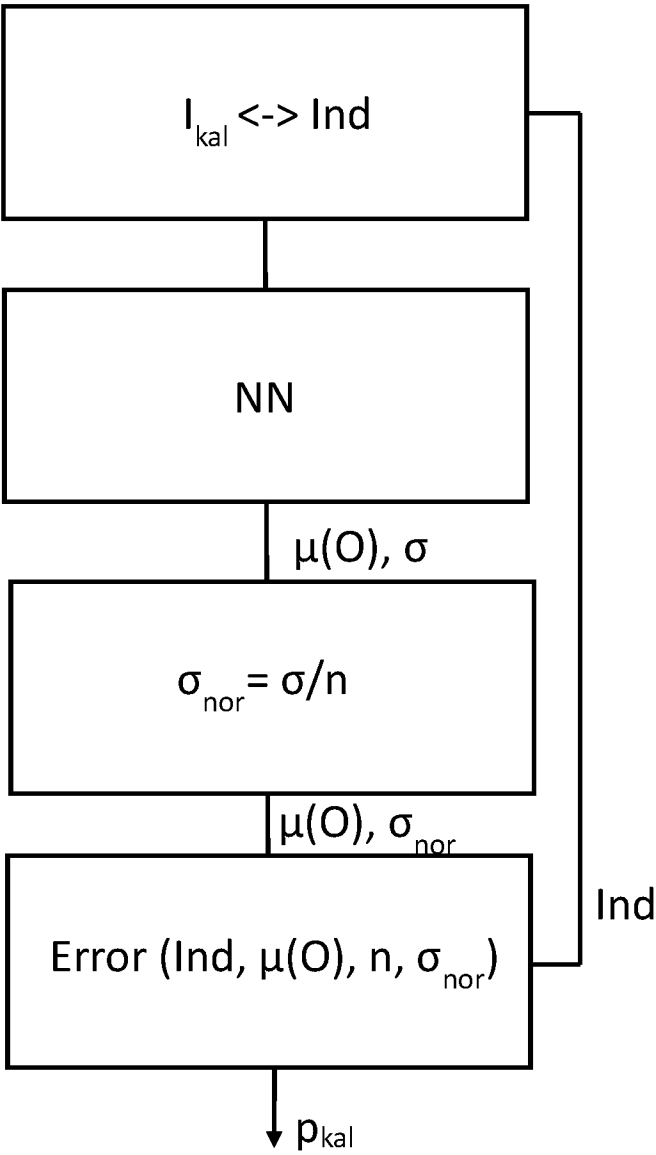


Fig. 1

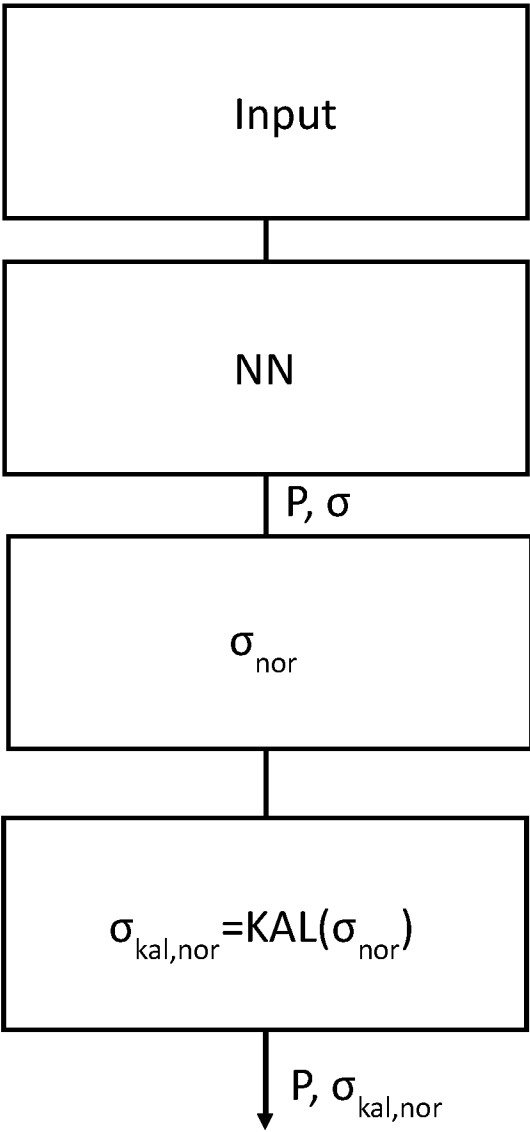


Fig. 2

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2024/057366

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G06N 3/09(2023.01)i; **G06N 3/047**(2023.01)i; **G06N 3/044**(2023.01)n; **G06N 3/045**(2023.01)n; **G06N 3/0464**(2023.01)n;
G06N 3/0475(2023.01)n; **G06N 3/0499**(2023.01)n

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G06N

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPO-Internal

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	BHATT DHAIVAT ET AL. "f-Cal: Aleatoric uncertainty quantification for robot perception via calibrated neural regression" 2022 INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION (ICRA), IEEE, 23 May 2022 (2022-05-23), pages 6533-6539 DOI: 10.1109/ICRA46639.2022.9811903 XP034146633 abstract figures 1-3 page 6533 - page 6538	1-14
A	DI FENG ET AL. "Towards Safe Autonomous Driving: Capture Uncertainty in the Deep Neural Network For Lidar 3D Vehicle Detection" ARXIV.ORG, CORNELL UNIVERSITY LIBRARY, 201 OLIN LIBRARY CORNELL UNIVERSITY ITHACA, NY 14853, 14 April 2018 (2018-04-14), XP081551113 abstract section III. A.	5, 6



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

28 June 2024

Date of mailing of the international search report

15 July 2024

Name and mailing address of the ISA/EP

European Patent Office
p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk
Netherlands (Kingdom of the)

Telephone No. (+31-70)340-2040

Facsimile No. (+31-70)340-3016

Authorized officer

Veynachter, Alexis

Telephone No.

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES

INV. G06N3/09 G06N3/047
ADD. G06N3/044 G06N3/045 G06N3/0464 G06N3/0475 G06N3/0499

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
G06N

Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	BHATT DHAIVAT ET AL: "f-Cal: Aleatoric uncertainty quantification for robot perception via calibrated neural regression", 2022 INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION (ICRA), IEEE, 23. Mai 2022 (2022-05-23), Seiten 6533-6539, XP034146633, DOI: 10.1109/ICRA46639.2022.9811903 [gefunden am 2022-07-12] Abstract Abbildungen 1-3 Seite 6533 - Seite 6538 ----- - / -	1-14

☒ Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen ☐ Siehe Anhang Patentfamilie

- * Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

"E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist
- "T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung:: die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung:: die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche	Absendedatum des internationalen Recherchenberichts
28. Juni 2024	15/07/2024
Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Bevollmächtigter Bediensteter Veynachter, Alexis

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	DI FENG ET AL: "Towards Safe Autonomous Driving: Capture Uncertainty in the Deep Neural Network For Lidar 3D Vehicle Detection", ARXIV.ORG, CORNELL UNIVERSITY LIBRARY, 201 OLIN LIBRARY CORNELL UNIVERSITY ITHACA, NY 14853, 14. April 2018 (2018-04-14), XP081551113, Abstract III. A. -----	5,6