

(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
02. Januar 2020 (02.01.2020)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2020/002100 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:

B60W 30/095 (2012.01) *B60W 50/00* (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2019/066234

(22) Internationales Anmeldedatum:
19. Juni 2019 (19.06.2019)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2018 115 253.1
25. Juni 2018 (25.06.2018) DE

(71) Anmelder: TRW AUTOMOTIVE GMBH [DE/DE]; Industriestraße 20, 73551 Alfdorf (DE).

(72) Erfinder: LIENKE, Christian; Wenkerstraße 13, 44141 Dortmund (DE). WISSING, Christian; Bluecherstraße 22, 44147 Dortmund (DE). SCHMIDT, Manuel; Grotenbachstraße 19, 44225 Dortmund (DE). HOMANN, Andreas; Roßbachstraße 53, 44369 Dortmund (DE). BERTRAM, Torsten; Am Deich 46, 40547 Duesseldorf (DE). KELLER, Martin; Germaniastraße 24, 44379 Dortmund (DE). GLANDER, Karl-Heinz; Im Pfingsterfeld 6, 40789 Monheim (DE).

(74) Anwalt: OESTREICHER, Lucas; ZF Active Safety GmbH, Carl-Spaeter-Strasse 8, 56070 Koblenz (DE).

(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, CZ, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN,

(54) Title: METHOD FOR OPERATING AN AT LEAST PARTIALLY AUTOMATED VEHICLE

(54) Bezeichnung: VERFAHREN ZUM BETREIBEN EINES WENIGSTENS TEILWEISE AUTOMATISIERTEN FAHRZEUGS

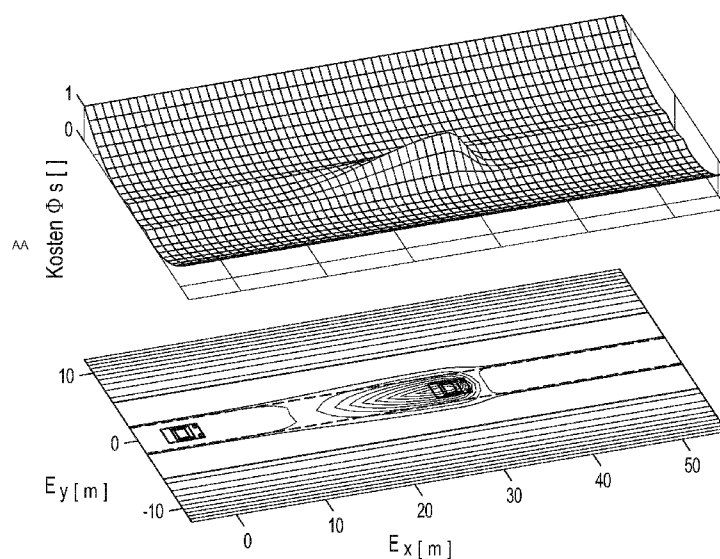


Fig. 4

AA Costs

(57) Abstract: In a method for operating an at least partially automated vehicle, at least one object in the surroundings of the vehicle is identified from surroundings sensor data, and a surroundings model (220) of the vehicle is created, an object position and at least one object movement feature are determined for the identified object and transferred into the surroundings model (220), a trajectory (250) for the vehicle is calculated from the surroundings model (220) by means of an optimization method, and the vehicle is controlled in accordance with the calculated trajectory.

(57) Zusammenfassung: Bei einem Verfahren zum Betrieb eines zumindest teilautomatisierten Fahrzeugs werden aus Umfeldsensordaten wenigstens ein Objekt in der Umgebung des Fahrzeugs erkannt und ein Umgebungsmodell (220) des Fahrzeugs erstellt, für



WO 2020/002100 A1

HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, 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, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

- (84) **Bestimmungsstaaten** (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, 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, 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)

das erkannte Objekt eine Objektposition und wenigstens ein Objektbewegungsmerkmal ermittelt und in das Umgebungsmodell (220) übertragen, mittels eines Optimierungsverfahrens eine Trajektorie (250) für das Fahrzeug aus dem Umgebungsmodell (220) berechnet und das Fahrzeug gemäß der berechneten Trajektorie angesteuert.

Verfahren zum Betreiben eines wenigstens teilweise automatisierten Fahrzeugs

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Betreiben eines wenigstens teilweise automatisierten Fahrzeugs und insbesondere das Ermitteln einer von dem Fahrzeug zu fahrenden Trajektorie, ohne mit anderen Objekten in der Umgebung des Fahrzeugs zu kollidieren. Objekte, die sich in der Umgebung des Fahrzeugs befinden, werden im Rahmen der folgenden Beschreibung auch als Hindernisse oder Hindernisfahrzeuge bezeichnet. Der Begriff Hindernis erfasst alle Verkehrsteilnehmer, die im Allgemeinen beweglich sind, z.B. auch momentan an einer Ampel stehende Fußgänger. Das Fahrzeug, für welches die zu fahrende Trajektorie ermittelt wird, ist hier auch als Egofahrzeug bezeichnet. Die Begriffe Umgebungsmodell und Umfeldmodell werden synonym gebraucht.

In der Architektur moderner automatisierter Fahrzeuge spielen die Aufgaben Wahrnehmung, Planung und Steuerung eine wichtige Rolle. Komfortables und sicheres Fahren setzt Wissen über das umgebende Umfeld voraus. Ausgehend von dem Wissen über Umfeld des Fahrzeugs, also der derzeitigen Fahrsituation ist eine Trajektorie zu planen, entlang der das Fahrzeug automatisiert fahren kann. Bekannte Trajektorienplanungsverfahren können die Nachteile haben, dass es ihnen an einer Garantie für eine vollständige Lösung in einer Echtzeitanwendungen mangelt und mit ansteigender Komplexität der Rechenzeitbedarf unangemessen ansteigt.

Es ist Aufgabe der Erfindung, die Nachteile des Standes der Technik zu überwinden.

Gemäß dem erfindungsgemäßen Verfahren zum Betrieb eines zumindest teilautomatisierten Fahrzeugs wird aus Umfeldsensordaten wenigstens ein Objekt in der Umgebung des Fahrzeugs erkannt und ein Umgebungsmodell des Fahrzeugs erstellt. Dabei werden für das erkannte Objekt eine Objektposition und wenigstens ein Objektbewegungsmerkmal ermittelt und in das Umgebungsmodell übertragen. Mittels eines Optimierungsverfahrens wird eine Trajektorie für das Fahrzeug aus dem Umgebungsmodell berechnet und das Fahrzeug wird gemäß der berechneten Trajektorie angesteuert. Das Fahrzeug kann zum Bremsen, Beschleunigen und Lenken angesteuert werden.

Insbesondere wird die Trajektorie basierend auf Informationen berechnet, die durch Sensordaten wahrgenommen wird. Die Information, die durch Sensordaten wahrgenommen wird, wird an ein Planungsmodul übertragen. Dies wird dadurch erreicht, dass die Information, die durch Sensordaten wahrgenommen wird, in ein Umfeldmodell transformiert wird, welches fusionierte Informationen über die Straßengeometrie und Hindernisse, wie Fußgänger oder andere Fahrzeuge, enthält.

Die Umfeldsensordaten werden von einem Umfeldsensor oder durch Fusion der Daten mehrerer Umfeldsensoren, wie einer Kamera, einem Radar, einem Lidar und/oder einer Ultraschallsensorik, bereitgestellt und von einem Objekterkennungsmodul verarbeitet, das Objekte, deren Position relativ zum Fahrzeug und Objektbewegungsmerkmale, wie Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung ermittelt. Insbesondere ist das Umfeldmodell ein Potentialfeld, vorzugsweise ein Kostenpotentialfeld, in dem für befahrbare Bereiche niedrige Kosten angegeben sind und für Bereiche, die nicht befahren werden sollen, höhere Kosten. Insbesondere wird jedes ermittelte Objekt durch Verarbeitung des wenigstens einen Objektbewegungsmerkmals nach einem vordefinierten Regelsatz in das Umfeldmodell transformiert. Insbesondere wird eine Zielposition des Fahrzeugs von einem anderen Modul, wie ein Navigationsmodul, vorgegeben und in das Umfeldmodell transformiert. Dabei und für die Optimierung wird vorzugsweise das aus "Spline-based motion planning for automated driving," von C. Götte, M. Keller, T. Nattermann, C. Haß, K.-H. Glander, T. Bertram in Proceedings of the 20th IFAC World Congress, 2017, pp. 9444–9449, bekannte Verfahren angewandt.

Die Berechnung der Trajektorie erfolgt in einem Egotrajektorienberechnungsmodul, das vorzugsweise auf einem Fahrzeugcomputer implementiert ist. Der Fahrzeugcomputer umfasst wenigstens einen Prozessor, der insbesondere mehrere Prozessorkerne aufweist, Speicher und Kommunikationsschnittstellen, wie Ethernet, CAN oder Flexray.

Vorzugsweise wird die Trajektorie für einen vorbestimmten Prädiktionszeitraum, auch Prädiktionshorizont genannt, berechnet. Das erfindungsgemäßen Verfahren benötigt

auch bei langem Prädiktionshorizont nur eine geringe Rechenzeit für die Ermittlung einer Trajektorie und erfasst dabei alle notwendigen Informationen hinsichtlich der erfassten Objekte. Insbesondere wird für jeden Zeitschritt des Prädiktionshorizonts, eine veränderte Position des erkannten Objekts unter Verwendung des Objektbewegungsmerkmals vorhergesagt und in das Umgebungsmodell entsprechend transformiert.

In einer bevorzugten Ausführung umfasst das Umgebungsmodell eine statische und eine dynamische Umgebungsmodellkomponente. Abkürzend wird im Folgenden auch nur von dem statischen Umfeldmodell oder dem dynamischen Umfeldmodell gesprochen, wenn von der statischen Umgebungs- oder Umfeldmodellkomponente bzw. der dynamischen Umgebungs- oder Umfeldmodellkomponente die Rede ist. Insbesondere sind sowohl das statische und das dynamische Umfeldmodell Potentialfelder, vorzugsweise Kostenpotentialfelder, in denen zu meidende Bereiche durch hohe Kosten berücksichtigt sind und befahrbare Bereiche durch niedrige Kosten. Vorzugsweise werden erkannte Objekte und deren Objektbewegungsmerkmale mit einem vorbestimmten Regelsatz verarbeitet um das dynamische Umfeldmodell zu erstellen. Insbesondere werden die Objekte als Bereich hoher Kosten in das Umfeldmodell transformiert.

In einer bevorzugten Ausführung basiert das dynamische Umgebungsmodell auf einer physikalischen Interpretation eines erforderlichen Sicherheitsabstands. Insbesondere werden für den Prädiktionszeitraum Bewegungsmerkmale, wie Geschwindigkeit und Trajektorie, des Egofahrzeugs und/oder wenigstens eines Objekts vorhergesagt. Vorzugsweise werden Relativgeschwindigkeit und Sicherheitsabstand für den Prädiktionszeitraum vorhergesagt. Abhängig von den ermittelten Daten wird anhand eines vordefinierten Regelsatzes des jeweils notwendigen Sicherheitsabstand bezüglich des erfassten Objekts in das dynamische Umgebungsmodell transformiert. Vorzugsweise umfasst das Transformieren mit dem vorbestimmten Regelsatz, das wenigstens eine Kostenfunktionen mit Objektdaten eines Objektes und Objektbewegungsmerkmale parametrisiert werden. Insbesondere wird die wenigstens eine Kostenfunktion durch vorhergesagte Abstände zwischen dem Egofahrzeug und dem Objekt parametrisiert.

In einer bevorzugten Ausführung enthält die statische Umgebungsmodellkomponente Randbedingungen oder Werte, die durch statische Objekte in der Umgebung des Fahrzeugs bestimmt sind. Als statische Objekte sind keine Verkehrsteilnehmer zu verstehen, sondern nicht bewegliche Hindernisse, wie Verkehrsinseln oder zeitweilige Baustellen, welche die Fahrbahn verengen. Insbesondere werden Informationen über statische Objekte von der Umfeldsensorik oder einem Car-2-X Kommunikationsmodul empfangen und anhand eines vordefinierten Regelsatzes in das statische Umgebungsmodell transformiert. Beispielsweise werden für einen nichtbefahrbaren Bereich Koordinaten übermittelt und an diesen Koordinaten das statische Umfeldmodell die Kosten derart erhöht, dass im Optimierungsschritt keine Trajektorie ermittelt wird, die diesen Bereich berührt.

In einer bevorzugten Ausführung werden Begrenzung einer Fahrspur in das statische Umfeldmodell durch Verarbeitung von fahrspurbezogenen Umfeldsensordaten mit einem vorbestimmten Regelsatz transformiert. Insbesondere werden mittels eines Regelsatzes automatisiert Informationen bezüglich der Fahrbahnmarkierung in das statische Umfeldmodell transformiert. Insbesondere enthält der Regelsatz für jede Fahrbahnmarkierung einen Parameter, mittels dem ein gewünschter Abstand zur Fahrbahnmarkierung vorgebar ist. Vorzugsweise werden Informationen bezüglich der Fahrbahnmarkierungen von einem Spurerkennungssystem übermittelt.

In einer bevorzugten Ausführung werden die Objektposition und das wenigstens eine Objektbewegungsmerkmal zur Parametrierung eines vorbestimmten Regelsatzes verwendet, um das Umgebungsmodell zu erstellen. Insbesondere umfasst der vorbestimmte Regelsatz das Berechnen von Abständen zwischen Egofahrzeug und einem erkannten Objekt umfasst.

In einer bevorzugten Ausführung wird die Trajektorie mittels einer Kombination aus Kurveninterpolation und numerischer Optimierung bestimmt wird, wobei insbesondere gradientenbasiert optimiert wird. Zum Beispiel kann ein Optimierungsverfahren angewandt werden, bei dem einer größten Steigung iterativ gefolgt wird.

In einer besonderen Ausführung wird die Trajektorie mittels splinebasierter Interpolation ermittelt wird.

In einer besonderen Ausführung wird das erkannte Objekt als ein potentielles Hindernis in der Umgebung des Fahrzeugs klassifiziert und aus dem wenigstens einen Objektbewegungsmerkmal und der Position des Objekts eine Trajektorie des Hindernisses berechnet. Typische Objektbewegungsmerkmale sind Momentangeschwindigkeiten in x-Richtung und/oder y-Richtung des Fahrzeugs. Vorzugsweise wird das wenigstens eine Objektbewegungsmerkmal sowohl für das Egofahrzeug als auch für ein Hindernisfahrzeug für den gesamten Prädiktionshorizont vorhergesagt. Insbesondere werden das Hindernis und die Trajektorie des Hindernisses in das Umgebungsmodell, insbesondere die dynamische Komponente des Umgebungsmodells, übertragen.

In einer besonderen Ausführung wird aus den Umfeldsensordaten eine Straßengeometrie, eine Fahrbahnmarkierung und/oder wenigstens ein Hindernis, wie ein Fußgänger und/oder ein anderes Fahrzeug, eine Objektgeschwindigkeit und/oder Objektbewegungsrichtung ermittelt und in das Umgebungsmodell übertragen.

Das Umfeldmodell wird als ein Potentialfeld repräsentiert, das aus einem statischen und einem dynamischen Teil zusammengesetzt wird. Der dynamische Teil stellt ein interpretierbares Modell bereit, das auf physikalischen Erwägungen basiert, wobei die Fahrzeugkinematik berücksichtigt wird. Die Neuheit, die den entwickelten Ansatz von anderen unterscheidet, liegt in der Tatsache, dass das Umfeldpotentialfeld Kenntnisse über die zukünftige Entwicklung der derzeitigen Situation durch die Verwendung von Trajektorienplanung und Hindernisprädiktion einbezieht, was zeitgleich den einzuhaltenden Sicherheitsabstand beeinflusst. Ein festgelegter, überdimensionierter Sicherheitsabstand, ohne Bezug zu der sich entwickelnden Situation, wird zu unnötig hohem Abbremsen führen, wohingegen ein vorbestimmter, unterdimensionierter Sicherheitsabstand zu riskantem Verhalten führt. Aufgrund seines prädiktiven Charakters verbessert das entwickelte Umfeldmodell erheblich Sicherheit und Komfort in komplexen Verkehrsszenarien. Die Analyse zeigt, dass das entwickelte Um-

feldmodell für Autobahnszenarien uneingeschränkt geeignet ist. Darüber hinaus kann das Umfeldmodell durch eine fortgeschrittene Berechnung des Bremsabstands dahingehend weitergebildet werden, dass es zum Beispiel den Straßenzustand berücksichtigt.

Die Trajektorie des Fahrzeugs und/oder des Hindernisses kann durch eine Kombination aus Kurveninterpolation und numerischer Optimierung berechnet werden. Damit wird eine effiziente Trajektorienplanung sichergestellt. Der große Vorteil ist die Fähigkeit, eine optimale Lösung für verschiedene Manöver selbst in einem komplexen Szenario zu finden.

Das Umfeldmodell kann ein Potentialfeld mit hohen Potentialen für nicht verhandelbare Bereiche und niedrigen Potentialen für verhandelbare Bereiche umfassen. Das Umfeldmodell kann aus einem statischen und einem dynamischen Potentialfeld zusammengesetzt werden.

Eine statische Komponente des Umfeldmodells kann durch polynomiale Straßenmarkierungen bereitgestellt werden. Insbesondere wird die Straßenmarkierung als Polynom 3. Ordnung an das Trajektorienplanungsmodul übermittelt und an bestimmten Positionen ausgewertet, um Abstände zwischen dem Egofahrzeug und der Straßenmarkierung zu ermitteln. Vorzugsweise basiert das statische Umfeldmodell auf den ermittelten Abständen. Um beide Komponenten des Umfeldmodells zu kombinieren, können die Komponenten in ein gemeinsames Potentialfeld transformiert werden, sodass ein umfassendes Umgebungsmodell gebildet wird.

Um eine holistische Beschreibung des Umfelds zu gewinnen, werden insbesondere beide Repräsentationen derart in ein Potentialfeld transformiert, dass diese zu einem umfassenden Umfeldmodell kombiniert werden. Damit wird das Umfeldmodell kombiniert, um die Aufgabe der Trajektorienplanung für automatisiertes Fahren auszuführen.

Insbesondere werden andere Objekte, die Hindernisse sein können, wenn die Trajektorie berechnet wird, durch eine Kreisform angenähert, wodurch ein vordefi-

nierter Sicherheitsabstand eingehalten wird, um der räumlichen Ausdehnung des Egofahrzeugs und des Hindernisfahrzeugs Rechnung zu tragen. Das statische Umfeld wird mittels eines Abstands zur jeweiligen Straßenbegrenzung modelliert.

In einer bevorzugten Ausführung kann ein Hindernis in der Umgebung des Fahrzeugs detektiert und eine Trajektorie des Hindernisses berechnet werden. Das Hindernis und die berechnete Trajektorie werden in das Umfeldmodell transformiert, insbesondere in die dynamische Komponente des Umfeldmodells.

Damit wird durch Beeinflussung des dynamischen Potentialfelds die Information, die durch die Hindernis_trajektorienprädiktion bereitgestellt wird, direkt im Egotrajektorienplanungsprozess berücksichtigt. Der Begriff festgelegt ist hier definiert als festgelegt bezüglich der Zeit innerhalb des Prädiktionshorizonts des Trajektorienplanungsalgorithmus, das heißt, dass die Sicherheitsabstände während der Planungsphase sich über die Zeit nicht ändern.

Eine statische Komponente des Umfeldmodells oder ein statisches Umfeldmodell können durch polynomiale Straßenmarkierungen bereitgestellt werden. Die dynamische Komponente des Umfeldmodells oder das dynamische Umfeldmodell können durch eine Hindernisliste gebildet werden. Um beide Komponenten des Umfeldmodells zu kombinieren, können die Komponenten in ein Potentialfeld derart transformiert werden, dass ein umfassendes Umgebungsmodell gebildet wird.

Um eine holistische Beschreibung des Umfelds zu gewinnen, können beide Repräsentationen derart in ein Potentialfeld transformiert werden, dass sie in ein umfassendes Umfeldmodell kombiniert werden. Damit wurde das Umfeldmodell kombiniert, um die Aufgabe der Trajektorienplanung für automatisiertes Fahren zu ermöglichen.

Weitere Merkmale, Vorteile und Eigenschaften der Erfindung werden anhand der Beschreibung bevorzugter Ausführungen der Erfindung unter Verweis auf die Figuren erklärt, die zeigen:

Fig. 1: Eine Darstellung des prädiktiven Charakters des Umfeldmodells, während das dynamische Potentialfeld mithilfe des Hindernistrajektorienprädiktionsansatzes aufgebaut wird;

Fig. 2 ein statisches Potentialfeld, das die zwei unterschiedlichen Modelle für durchgezogene und gestrichelte Straßenmarkierungsarten zeigt, wobei zu Visualisierungszwecken Konturlinien auf die Straße projiziert sind;

Fig. 3: eine Darstellung des dynamischen Potentialfelds, wobei ein potentielles Kollisionsrisiko gekennzeichnet ist;

Fig. 4: das sich durch Superposition ergebende resultierende Umfeldpotentialfeld des statischen und dynamischen Potentialfelds;

Fig. 5: eine Tabelle, die die Startbedingungen des Egofahrzeugs und der Hindernisfahrzeuge im analysierten Szenario wiedergibt;

Fig. 6: die Momentansituation, dargestellt für jeden Zeitschritt, mit Bezug zum sich bewegendem Egofahrzeug, wobei zusätzlich zum Umfeldpotentialfeld die geplante Egotrajektorie dargestellt ist;

Fig. 7: eine schematische Darstellung eines Assistenzsystems, das nach dem erfindungsgemäßen Verfahren arbeitet.

Wie in Fig. 1 gezeigt, passt sich das Umfeldmodell vorteilhafterweise an die prädizierte zukünftige Entwicklung der Momentansituation an. Zu diesem Zweck wird im Planungsschritt für die Trajektorie des Fahrzeugs, das heißt die Egotrajektorie, eine Spline-basierte Interpolationsstrategie verwendet. Die Trajektorienplanung wird für Trajektorie B als nichtlineares Programm formuliert:

$$\gamma^*(B, \Gamma_1) = \min_B \sum_{i=1}^z \gamma_i(B, \Gamma_1) \quad (1)$$

wobei

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_1 &= \mathbf{x}_s, \\ \mathbf{f}_k(\mathbf{x}) &= \mathbf{0}, \\ \mathbf{h}_k(\mathbf{x}) &\leq \mathbf{0}, \end{aligned}$$

mit dem tatsächlichen Zustand $\mathbf{x}_s$ und der Gleichheitsrandbedingung $\mathbf{f}_k$ und den Ungleichheitsrandbedingungen $\mathbf{h}_k$. Der Zielzustand $\mathbf{x}_g$ ist Teil der Optimierung. Es gibt z quadratische Funktionen γ_i , die aus Objekten oder Zielen $\mathbf{o}_i$ zusammengesetzt sind, welche durch die Matrix Γ_1 gewichtet werden

$$\gamma_i(B, \Gamma_1) = \mathbf{o}_i^T(B) \Gamma_1 \mathbf{o}_i(B). \quad (2)$$

Die Lösung des in Gleichung 1 formulierten nichtlinearen Problems ist durch die Annäherung der harten Randbedingungen gegeben. Daher werden die Randbedingungen $\mathbf{f}_k$ durch die Verwendung des Konzepts der weichen Randbedingungen in Strafterme transformiert. Dadurch wird eine effiziente echtzeitfähige Lösung erreicht. Aufgrund der Verwendung einer vereinfachten Fahrzeugdynamikbeschreibung sind Gleichheitsrandbedingungen kein Teil des Optimierungsproblems. Ungleichheitsrandbedingungen werden ersetzt durch

$$\chi(\mathbf{h}_k) = \max\{[\mathbf{0}, \mathbf{h}_k]\}. \quad (3)$$

Damit ist der Gesamtfehlervektor $\mathbf{e}(B) : B \rightarrow \mathbb{R}^{d_{err}}$

$$\mathbf{e} = [\mathbf{o}_1, \mathbf{o}_2, \dots, \mathbf{o}_z, \chi(\mathbf{h}_1), \chi(\mathbf{h}_2), \dots, \chi(\mathbf{h}_{n-1})]^T. \quad (4)$$

Die Kostenfunktion kann dann wie folgt definiert werden

$$\Phi(\mathbf{b}, \mathbf{\Omega}) = \mathbf{e}(\mathbf{b})^T \mathbf{\Omega} \mathbf{e}(\mathbf{b}), \quad (5)$$

mit dem Optimierungsvektor $\mathbf{b}$ der Dimension d_{opt} und der Gewichtsmatrix

$\mathbf{\Omega} \in \mathbb{R}^{d_{err} \times d_{err}}$, die die Gewichte für die jeweiligen Ziele im Sinne des automatisierten Fahrens enthält. Die optimale Lösung für das transformierte Problem ist gegeben durch

$$\mathbf{b}^* = \arg \min_{\mathbf{b}} \Phi(\mathbf{b}, \mathbf{\Omega}), \quad (6)$$

was zu einem nichtlinearen Kleinste-Quadrate-Problem führt, das iterativ mit dem Levenberg-Marquardt-Algorithmus gelöst wird. Nach jedem erfolgreichen Levenberg-Marquardt-Schritt wird die derzeitige Lösung aktualisiert durch

$$\mathbf{b}^+ = \mathbf{b} + \Delta \mathbf{b}. \quad (7)$$

Die Grundgleichung des Levenberg-Marquardt-Algorithmus ist gegeben durch

$$(\mathbf{H} + \lambda_{LM} \mathbf{I}) \Delta \mathbf{b} = \mathbf{g} \quad (8)$$

Mit dem Dämpfungsfaktor λ_{LM} , der Identitätsmatrix $\mathbf{I}$ und dem Gradienten

$$\mathbf{g} = \mathbf{J}^T \mathbf{\Omega} \mathbf{e}(\mathbf{b}). \quad (9)$$

Die Jacobi-Matrix $\mathbf{J} \in \mathbb{R}^{d_{err} \times d_{opt}}$ verwendet, um eine Annäherung der Hesse-Matrix $\mathbf{H} \in \mathbb{R}^{d_{opt} \times d_{opt}}$ zu berechnen, mit

$$\mathbf{H} = \mathbf{J}^T \mathbf{\Omega} \mathbf{J}. \quad (10)$$

Aus den Gleichungen (9) und (10) wird das Erfordernis einer differenzierbaren Umfeldmodellrepräsentation abgeleitet. Im Folgenden werden die Erd- und Fahrzeugkoordinatensysteme durch vorangestellte hochgestellte Buchstaben E und F gekennzeichnet. Der Prädiktionshorizont wird festgelegt als T_p mit konstanten Zeitintervallen $t \in [t_k, t_{k+1}]$. Mit den Zuständen $\mathbf{x}_k = [^F x_k, ^F y_k]^T$ und $k = 1 \dots n$ ergibt sich die Egofahrzeugtrajektorie als

$$\mathbf{x}_{ego} = [\mathbf{x}_1, t_1, \mathbf{x}_2, t_2, \dots, \mathbf{x}_k, t_k, \dots, \mathbf{x}_n, T_p]^T. \quad (11)$$

Bevor die obige gradientenbasierte Trajektorienplanung angewandt wird, wird das Umfeldmodell wie im Folgenden beschrieben gebildet. Das Umfeldmodell wird in vorbestimmter Repräsentation in einem Speicher eines Trajektorienplanungsmoduls oder Umfeldfusionsmoduls gespeichert. Das Trajektorienplanungsmodul oder Umfeldfusionsmodul kann auf einer elektronischen Kontrolleinheit oder einer anderen Recheneinheit an Bord des Fahrzeugs implementiert sein. Das jeweilige Modul wird mit anderen Fahrzeugsystemen verbunden, die Sensordateninformationen bereitstellen.

In einer bevorzugten Ausführung wird ein Potentialfeld als Repräsentation des Umfelds gewählt. Damit wird ein differenzierbares Umfeldmodell erreicht. Beide, das statische und das dynamische Umfeldmodell können separat berücksichtigt werden. Allerdings werden sie in kombinierter Weise berechnet, um ein holistisches Umfeldmodell bereitzustellen. Zum Zwecke der Diskussion und Erklärung werden die Eigenschaften des entwickelten statischen und dynamischen Umfeldmodells anhand eines Beispiels mit drei geraden Fahrspuren und dem Ego- sowie dem Hindernisfahrzeug auf der Mittelspur der Straße illustriert (z.B. Fig. 2).

Statisches Umfeldmodell

Das statische Umfeldmodell kann als ein erweiterter Fahrkorridor betrachtet werden, der den verhandelbaren Raum anzeigt, das heißt die verfügbaren Spuren, die dem Egofahrzeug erlauben, in die beabsichtigte Fahrtrichtung zu fahren. Es werden höchstens drei Spuren berücksichtigt, sodass, falls verfügbar, die möglichen Spuren sich aus der Egospur und der rechten und linken Nachbarspur zusammensetzen.

Dies bedeutet keine Beschränkung hinsichtlich der Leistungsfähigkeit für Szenarien mit mehr als drei Spuren, da immer noch genügend Information vorhanden ist, um das Egofahrzeug in die Lage zu versetzen, vollständige Basismanöver wie Spurwechsel und Spurhalten auszuführen. Es ist zu bemerken, dass außerdem Hindernisse, die in dem dynamischen Umfeldmodell eingeschlossen sind, unabhängig von der Anzahl der detektierten Spuren prädiziert werden. Informationen über die vorhandenen Spuren werden durch an Bord befindliche Kamerasensoren gewonnen, wobei die Gestalt einer jeweiligen Spur als Polynom dritter Ordnung pro Spurmarkierung angegeben wird. Um das statische Potentialfeld zu erzeugen, wird der Modelltyp für jede Spurmarkierung abhängig vom Typ der Spurmarkierung gewählt, sodass zwischen Spurmarkierungen, die überfahren werden dürfen, und solchen, die nicht überfahren werden dürfen, unterschieden wird. Zweckmäßigerweise werden alle Spurmarkierungstypen, die vom Egofahrzeug nicht überfahren werden dürfen, kopiert und als durchgezogene Spurmarkierungen gekennzeichnet, wohingegen alle überfahrbaren Spurmarkierungstypen als gestrichelte Spurmarkierungen gekennzeichnet werden.

Spurmarkierungen werden im Egofahrzeugkoordinatensystem F von links nach rechts gezählt, beginnend mit Index $l = 0$ für die linke Spurmarkierung der linken Spur, Index $l = 1$ für die linke und Index $l = 2$ für die rechte Spurmarkierung, sowie Index $l = 3$ für die rechte Spurmarkierung der benachbarten rechten Spur. Das Polynom wird für $^F x_k$ eines jeden Trajektorienpunkts ausgewertet und der Abstand zur Straßenbegrenzung wird durch den Abstand $\Delta \tilde{y}_k^\ell$ zwischen den $^F y$ -Koordinaten der Trajektorie und folgenden Spurmarkierungspolynomen l angenähert

$$\Delta \tilde{y}_k^{\ell=0} = +(^F y_k - ^F y_k^{\ell=0}), \quad (12a)$$

$$\Delta \tilde{y}_k^{\ell=1} = +(^F y_k - ^F y_k^{\ell=1}), \quad (12b)$$

$$\Delta \tilde{y}_k^{\ell=2} = -(^F y_k - ^F y_k^{\ell=2}), \quad (12c)$$

$$\Delta \tilde{y}_k^{\ell=3} = -(^F y_k - ^F y_k^{\ell=3}). \quad (12d)$$

In Abhängigkeit vom Spurmarkierungstyp ist

$$\Delta y_k^\ell = \begin{cases} \Delta \tilde{y}_k^\ell & \text{für eine durchgezogene Spurmarkierung} \\ -|\Delta \tilde{y}_k^\ell| & \text{für eine gestrichelte Spurmarkierung} \end{cases} \quad (13)$$

und mit einem gewünschten Abstand zur Spurmarkierung Δ_l führt dies zu

$$h_{\ell,k} = \Delta y_k^\ell + \Delta_\ell. \quad (14)$$

Das statische Potentialfeld mit den Kosten Φ_s wird aus der Superposition aller $\chi(\mathbf{h}_\ell)$ unter Verwendung der Gleichung (3), der Gleichung (4) und der Gleichung (5) erzeugt. Dabei $\mathbf{h}_l$ die vektorisierte Form von $h_{l,k}$. Das resultierende Potentialfeld für das statische Umfeld wird in Fig. 2 dargestellt.

Dynamisches Umfeldmodell

Um dynamische Hindernisse zu berücksichtigen, werden die Hindernisse unter Verwendung einer Spurwechselerkennung und der prädizierten Zeit bis zum Spurwechsel t_{ttlc} für die Trajektorienprädiktion prädiziert. Im Folgenden werden die Hindernisgrößen mit ϱ gekennzeichnet. Für $\varrho = 1 \dots \rho$ Hindernisse wird der Lateral- und Longitudinalabstand zwischen den Ego- und Hindernisfahrzeugtrajektorien separat berechnet

$$\Delta x_k^\varrho = {}^F x_k - {}^F x_k^\varrho, \quad (15)$$

$$\Delta y_k^\varrho = {}^F y_k - {}^F y_k^\varrho. \quad (16)$$

Auch Sicherheitsgründen wird der zu erfüllende notwendige Abstand durch die Annäherung der Bremsdistanz gegeben

$$\Delta b^\varrho = \Delta v^{\varrho 2} / (2a) \quad (17)$$

mit dem Parameter a für die maximale Bremsverzögerung. Allerdings ist bezüglich Gleichung 17 jeder andere gewünschte Abstand möglich. Die Relativgeschwindigkeit Δv^ϱ wird in Längsrichtung wie folgt berechnet

$$\Delta v_{x,k}^\varrho = {}^F v_{x,k} - {}^F v_{x,k}^\varrho \quad (18)$$

und in Lateralrichtung

$$\Delta v_{y,k}^\varrho = {}^F v_{y,k} - {}^F v_{y,k}^\varrho. \quad (19)$$

Im Fall geringer Relativgeschwindigkeiten sollte zutreffen, dass ein minimaler Längsabstand $\bar{\Lambda}_{lon}^e$ und ein minimaler Lateralabstand $\bar{\Lambda}_{lat}^e$ zwischen dem Ego- und Hindernisfahrzeug, unter Berücksichtigung der räumlichen Ausdehnung der Fahrzeuge, jederzeit erfüllt ist. Die gemessene Richtung $^F\lambda^e$ des jeweiligen Hindernisfahrzeugs wird verwendet, um den vorbestimmten minimalen gewünschten Sicherheitsabstand entsprechend der momentanen Situation zu drehen. Dies ergibt

$$\Lambda_{lon}^e = \max\{|\bar{\Lambda}_{lon}^e \cos(^F\lambda^e)|, |\bar{\Lambda}_{lat}^e \sin(^F\lambda^e)|\}, \quad (20)$$

$$\Lambda_{lat}^e = \max\{|\bar{\Lambda}_{lat}^e \cos(^F\lambda^e)|, |\bar{\Lambda}_{lon}^e \sin(^F\lambda^e)|\}. \quad (21)$$

Mit Gleichung (17) wird der Sicherheitsabstand σ^e bezüglich eines jeweiligen Hindernisses e berechnet. Für die richtungsabhängige Komponente des dynamischen Umfeldmodells wird für die Längs- und Lateralrichtung das algebraische Vorzeichen berücksichtigt.

$$\sigma_{lon}^e = \begin{cases} \Lambda_{lon}^e & \text{sgn}(\Delta x_k^e \Delta v_{x,k}^e) > 0 \\ \max\{\Delta b_{lon}^e, \Lambda_{lon}^e\} & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (22)$$

$$\sigma_{lat}^e = \begin{cases} \Lambda_{lat}^e & \text{sgn}(\Delta y_k^e \Delta v_{y,k}^e) > 0 \\ \max\{\Delta b_{lat}^e, \Lambda_{lat}^e\} & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (23)$$

Damit muss für den Fall, dass sich das Ego- und das Hindernisfahrzeug voneinander wegbewegen, lediglich der Minimalabstand $\Lambda_{lon/lat}^e$ zwischen beiden Fahrzeugen erfüllt sein. Eine Gauss-Funktion wird verwendet, um das dynamische Potentialfeld zu modellieren, indem der Momentanabstand und der gewünschte Sicherheitsabstand berücksichtigt werden. Dadurch wird das Erfordernis eines differenzierbaren Umfeldmodells inhärent erfüllt

$$d_{lon}^e = e^{-0.5 \left(\frac{\Delta x^e}{\sigma_{lon}^e} \right)^2}, \quad (24)$$

$$d_{lat}^e = e^{-0.5 \left(\frac{\Delta y^e}{\sigma_{lat}^e} \right)^2}. \quad (25)$$

Auf Basis der Eigenschaften der Gauss-Funktion führt die Kombination von Längs- und Lateralpotentialkosten zu

$$h_{e,k} = d_{lon}^e d_{lat}^e. \quad (26)$$

Die Kosten Φ_D , welche das dynamische Potentialfeld repräsentieren, werden mit vektorisierten $h_{g,k}$ für jedes $\chi(h_g)$ analog zum statischen Potentialfeld erzeugt. Die Charakteristik des dynamischen Potentialfelds in Bezug auf einen Unterschied in der Orientierung wird in Fig. 3 gezeigt. Auf Basis der Relativgeschwindigkeit in Längs- und Lateralrichtung wird der Sicherheitsabstand angepasst.

Wie in Fig. 3(a) und (b) gezeigt, fährt das Egofahrzeug mit einer Geschwindigkeit von 120 km/h. In Fig. 3(a) hat das Hindernisfahrzeug eine Geschwindigkeit von 85 km/h mit einem Kurswinkel von $^F\lambda^{g=1} = 0^\circ$. In Fig. 3(b) hat das Hindernisfahrzeug 85 km/h mit einem Kurswinkel von $^F\lambda^{g=1} = -13^\circ$. Das dynamische Potentialfeld wird für jeden prädizierten Zeitpunkt gebildet, um die prädizierten Relativgeschwindigkeiten zu dieser Zeit zu berücksichtigen. Damit wird es möglich, die situationsabhängigen variierenden Sicherheitsabstände zu berücksichtigen.

Umfeldpotentialfeld

Das resultierende Umfeldmodell ergibt sich durch die Superposition des statischen und des dynamischen Potentialfelds. Das statische Potentialfeld teilt sich in verhandelbaren und nicht verhandelbaren Raum basierend auf der Straßengeometrie auf, wohingegen das dynamische Potentialfeld ein potenzielles Kollisionsrisiko mit dynamischen Hindernissen repräsentiert. In Fig. 4 wird die Kombination des statischen Potentialfelds (vgl. Fig. 2) und des dynamischen Potentialfelds mit dem Hindernisfahrzeug, das mit dem Egofahrzeug fluchtet (vgl. Fig. 3(a) dargestellt. Da sowohl das statische als auch das dynamische Potentialfeld beide die resultierende Trajektorie beeinflussen, muss ein Kompromiss gefunden werden, der die Realisierung von Spurhalte- und Spurwechselmanövern ausbalanciert. Dies kann realisiert werden, indem die Parameter für den Trajektorienplanungsansatz (z.B. die Gewichtsmatrix Ω) und die Parameter des Umfeldmodells (z.B. der gewünschte Abstand zur jeweiligen Spurmarkierung Δ_l und der minimale Sicherheitsabstand $\tilde{\Delta}_{lon/lat}^g$) entsprechend gewählt werden. Aufgrund seiner Charakteristiken kann das entwickelte Umfeldmodell als prädiktives Umfeldpotentialfeld Φ_{DS} beschrieben werden.

In dem in den Figuren 1 bis 6 dargestellten Ausführungsbeispiel werden Sensordaten durch Kamera- und Radarsensoren bereitgestellt. Das Egofahrzeug ist mit Radarsensoren an der Front, am Heck und an den Seiten sowie einer nach vorne gerichteten Kamera ausgestattet. Damit werden Spurmarkierungsinformationen und fusionierte Informationen über Hindernisfahrzeuge bereitgestellt. Eine Referenzposition wird durch den Trajektorienplanungsansatz generiert und ebenso wird Receding Horizon Control (RHC) angewandt. Die Ergebnisse sind für gerade Spuren dargestellt, aber das entwickelte Umfeldmodell ist ebenso für gekrümmte Straßenszenarien gültig.

Um die Charakteristiken des Umfeldmodells in Zusammenarbeit mit dem optimierungsbasierten Trajektorienplanungsansatz in den Beispielen der Figuren 1 bis 6 ist ein Autobahnabschnitt mit drei Spuren von 3,75 m Breite und zwei Hindernisfahrzeugen gezeigt. Die Anfangsbedingungen zur Zeit $t = 0$ s sind in Fig. 5 (Tabelle 1) gezeigt. Während der Simulation können sich die Fahrzeuggeschwindigkeiten aufgrund des implementierten individuellen Fahrverhaltens der Verkehrsteilnehmer ändern. Fig. 6 zeigt die Ergebnisse, die durch den vorgestellten Ansatz erzielt werden, in Schritten von 1,5 s beginnend mit $t = 0,6$ s. Zu dieser Zeit sind das Egofahrzeug und das Hindernisfahrzeug 1 auf der äußersten rechten Spur. Das Egofahrzeug bewegt sich schneller als das Hindernisfahrzeug 1 und das dynamische Potentialfeld ist entsprechend der Relativgeschwindigkeit von etwa 35 km/h geformt. Im weiteren Verlauf überholt Hindernisfahrzeug 1 das langsamere Hindernisfahrzeug 2. Bezüglich des Egofahrzeugs überlagern sich zwei dynamische Potentialfelder. Der Sicherheitsabstand resultiert aus der Relativgeschwindigkeit derart, dass für das Hindernisfahrzeug 1 ein geringerer Sicherheitsabstand gültig ist als für das Hindernisfahrzeug 2. Wie das Hindernisfahrzeug 1 führt auch das Egofahrzeug einen Spurwechsel nach links aus, um das Hindernisfahrzeug 2 zu überholen.

Das Egofahrzeug, das durch das prädiktive Potentialfeld unterstützt wird, kann unmittelbar ein optimales Nachfolgemanöver auslösen. Durch Ausführen eines weiteren Spurwechsels nach links überholt das Egofahrzeug das Hindernisfahrzeug 1, wobei die gewünschte Geschwindigkeit beibehalten wird. Während des Manövers ist die Form des dynamischen Potentialfelds aufgrund nur geringer Abweichungen bezüg-

lich der Orientierung hauptsächlich in Längsrichtung orientiert. Das statische Potentialfeld ist hauptsächlich an den Straßenrändern sichtbar. Nichtsdestotrotz ist offensichtlich, dass das statische Feld präzises Spurhalten ermöglicht, indem die Spurdimensionen mithilfe des angewandten gestrichelten Spurmarkierungsmodells berücksichtigt werden. Das in Fig. 6 dargestellte Ergebnis zeigt deutlich die Abhängigkeit des Umfeldmodells von fundierten Sensordaten. Spurmarkierungen werden nur durch den Kamerasensor detektiert, was zu einer beschränkten Spurmarkierungsdetektion führen könnte durch Verdeckung oder ein zu schmales Sensorblickfeld. Innerhalb des Umfeldmodells wird der Sichtbereich einer jeweiligen Spurmarkierung derart berücksichtigt, dass keine Kosten generiert werden, wenn der Sichtbereich überschritten wird. In zukünftiger Arbeit können Schwierigkeiten, die durch geringe Sichtbereiche entstehen, mithilfe der Einbindung von Kartendaten gelöst werden.

In Fig. 6 muss festgestellt werden, dass die Ich-Trajektorie, die das Potentialfeld schneidet, nicht auf eine Kollision hindeutet, da das Umfeldpotentialfeld lediglich für den momentanen Zeitschritt dargestellt ist. Allerdings, basierend auf der prädizierten Situation, wird das sich entwickelnde Potentialfeld direkt in die Trajektorienplanung einbezogen.

In Fig. 7 ist ein Fahrerassistenzsystem schematisch dargestellt, welches nach dem erfindungsgemäßen Verfahren arbeitet. Das Egotrajektorienplanungsmodul (ETP) 200 empfängt Fahrsollvorgaben und Umfeldsensordaten über eine Schnittstelle 150. Solche Fahrsollvorgaben sind z.B. eine Zielposition, die von einem Navigationsmodul 140 bereitgestellt wird. Als Umfeldsensordaten werden von einem Spurerkennungsmodul 100 Fahrbahnmarkierungen als Polynome 3. Grades an das Egotrajektorienplanungsmodul 200 übermittelt. Auch andere Systeme, wie ein , können an das Egotrajektorienplanungsmodul 200 Daten übermitteln, die durch vorbestimmte Regelsätze in das Umfeldmodell 220 transformiert werden. In den weiter oben beschriebenen Beispielen werden zumindest Fahrspurmarkierungen vom Spurerkennungsmodul 100 an das ETP 200 übermittelt sowie Objektpositionen und deren Objektbewegungsmerkmale, wie Momentangeschwindigkeit und Richtung. Das ETP 200 verfügt über einen vordefinierten Regelsatz, der wie weiter im Einzelnen beschrieben angibt, mit welchen Berechnungen aus den übermittelten Fahrbahnmarkierungen das stati-

sche Umfeldmodell 222 zu ermitteln ist. Das ETP 200 arbeitet den im Abschnitt statisches Umfeldmodell beschriebenen Regelsatz ab und erstellt damit das statische Umfeldmodell 222. Gleichmaßen wird wie im Abschnitt dynamisches Umfeldmodell aus den erfassten Objekten und deren Objektbewegungsmerkmalen das dynamische Umfeldmodell 224 ermittelt. Schließlich ermittelt das ETP 200 durch Superposition der Umfeldmodelle 222 und 224 ein Gesamtumfeldmodell 220, das die Fahrsituation insgesamt wiedergibt. Die Umfeldmodelle 222 und 224 und das Gesamtumfeldmodell 220 werden für den gesamten Prädiktionshorizont berechnet. Mit Hilfe der oben beschriebenen Optimierungsmethodik wird eine Trajektorie 250 für den gesamten Prädiktionshorizont ermittelt.

Die ermittelte Trajektorie 250 wird an ein Fahrkontrollmodul 300 übermittelt, welches das Fahrzeug entsprechend der vorgegebenen Trajektorie steuert. Die Umfeldmodelle 222 und 224 werden fortlaufend jeweils nach Abschluss der Trajektorienberechnung mit den momentan vorliegenden Objekten und Objektbewegungsmerkmalen aktualisiert und die Optimierung wiederholt, so dass innerhalb des Prädiktionshorizonts der ersten Trajektorienplanung, insbesondere nach Ablauf von weniger als 20%, vorzugsweise weniger als 10% des Prädiktionshorizonts, eine neue Trajektorie 250 an das Fahrkontrollmodul 300 übermittelt wird.

Ein Vorteil einer oder mehrerer Ausführungsformen ist, dass eine allgemeine Repräsentation des Umfelds gewonnen wird, ohne das gewünschte Verhalten in das Umfeldmodell einzubeziehen. Ein anderer Vorteil einer oder mehrerer Ausführungen ist, dass der Sicherheitsabstand zwischen dem Fahrzeug, für das die Trajektorie geplant wird (Egofahrzeug oder Ego) und anderen Fahrzeugen, die Hindernisse (Alter) repräsentieren können, entsprechend der vorhergesagten Situation in Abhängigkeit von Relativgeschwindigkeit und Relativorientierung berechnet wird. Damit passt sich das Umfeldmodell an die prädizierte Zukunftsentwicklung der derzeitigen Situation an.

Bezugszeichen

100	Spurerkennungsmodul
110	Abstandshaltemodul
120	Spurwechselassistentenmodul
130	Fahrkomfortmodul
140	Navigationsmodul
150	Schnittstelle
200	Egotrajektorienplanungsmodul
220	Gesamtumfeldmodell
222	statisches Umfeldmodell
224	dynamisches Umfeldmodell
250	Trajektorie
300	Fahrkontrollmodul

Patentansprüche

- 1) Verfahren zum Betrieb eines zumindest teilautomatisierten Fahrzeugs, bei dem:
 - a) aus Umfeldsensordaten wenigstens ein Objekt in der Umgebung des Fahrzeugs erkannt und ein Umgebungsmodell des Fahrzeugs erstellt wird, wobei für das erkannte Objekt eine Objektposition und wenigstens ein Objektbewegungsmerkmal ermittelt und in das Umgebungsmodell übertragen werden,
 - b) mittels eines Optimierungsverfahrens eine Trajektorie für das Fahrzeug aus dem Umgebungsmodell berechnet wird, und
 - c) das Fahrzeug gemäß der berechneten Trajektorie angesteuert wird.
- 2) Verfahren nach Anspruch 1, bei dem das Umgebungsmodell eine statische und eine dynamische Umgebungsmodellkomponente umfasst.
- 3) Verfahren nach Anspruch 2, bei dem die dynamische Umgebungsmodellkomponente auf einer physikalischen Interpretation eines erforderlichen Sicherheitsabstands basiert.
- 4) Verfahren nach Anspruch 2 oder 3, bei dem die statische Umgebungsmodellkomponente Randbedingungen enthält, die durch statische Objekte in der Umgebung des Fahrzeugs bestimmt sind.
- 5) Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, bei dem die Objektposition und das wenigstens eine Objektbewegungsmerkmal zur Parametrierung eines vorbestimmten Regelsatzes verwendet werden, um das Umgebungsmodell zu erstellen.
- 6) Verfahren nach Anspruch 5, bei dem der vorbestimmte Regelsatz das Berechnen von Abständen zwischen Egofahrzeug und einem erkannten Objekt umfasst.
- 7) Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, bei dem die Trajektorie mittels einer Kombination aus Kurveninterpolation und numerischer Optimierung bestimmt wird, wobei insbesondere gradientenbasiert optimiert wird.
- 8) Verfahren nach einer der vorstehenden Ansprüche, bei dem die Trajektorie mittels splinebasierter Interpolation ermittelt wird.
- 9) Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, bei dem das Objekt ein potentiell Hindernis in der Umgebung des Fahrzeugs ist und aus dem wenigstens

einen Objektbewegungsmerkmal eine Trajektorie des Hindernisses berechnet wird.

- 10) Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, bei dem aus den Umfeldsensordaten eine Straßengeometrie, eine Fahrbahnmarkierung und/oder wenigstens ein Hindernis, wie einen Fußgänger und/oder ein anderes Fahrzeug, eine Objektgeschwindigkeit und/oder Objektbewegungsrichtung ermittelt und in das Umgebungsmodell übertragen werden.

1/5

—○— geplante Egotrajektorie —+— prädizierte Hindernistrajektorie

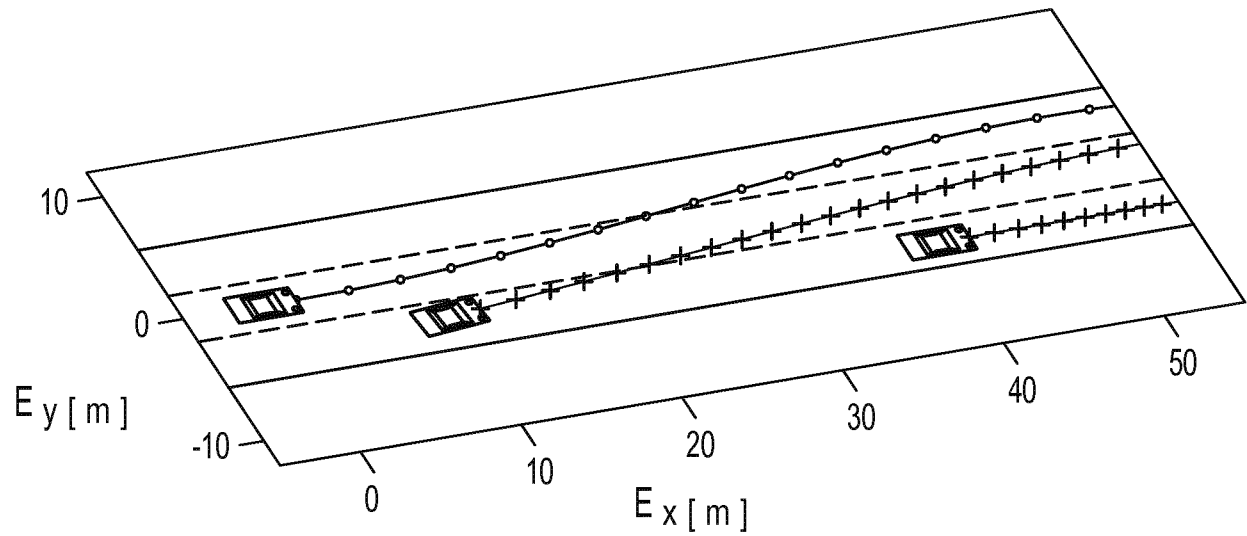


Fig. 1

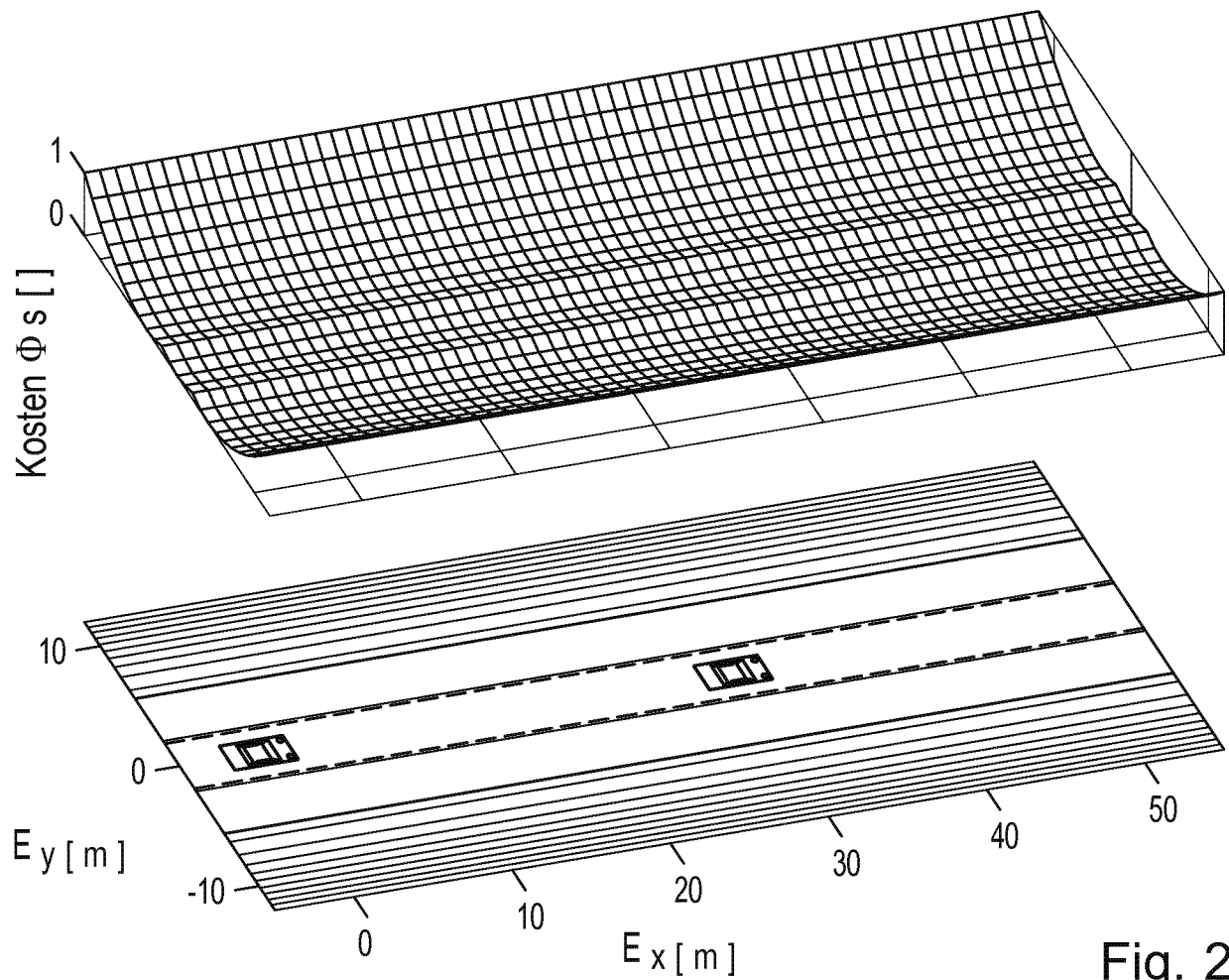


Fig. 2

2/5

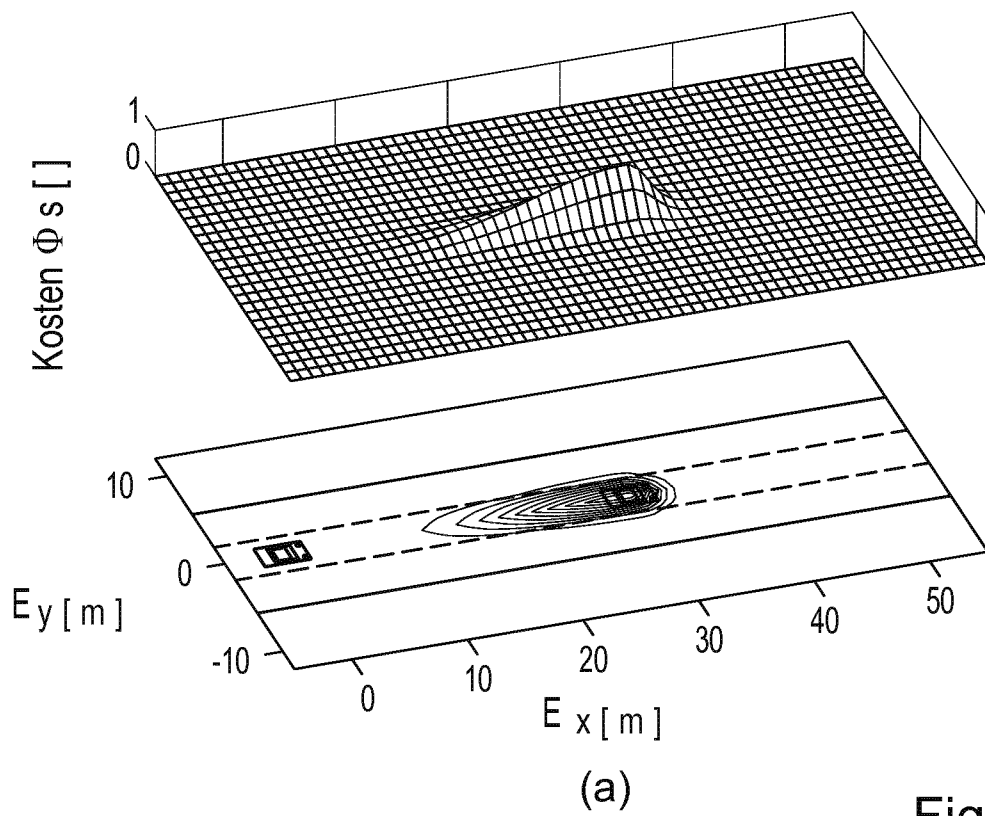


Fig. 3a

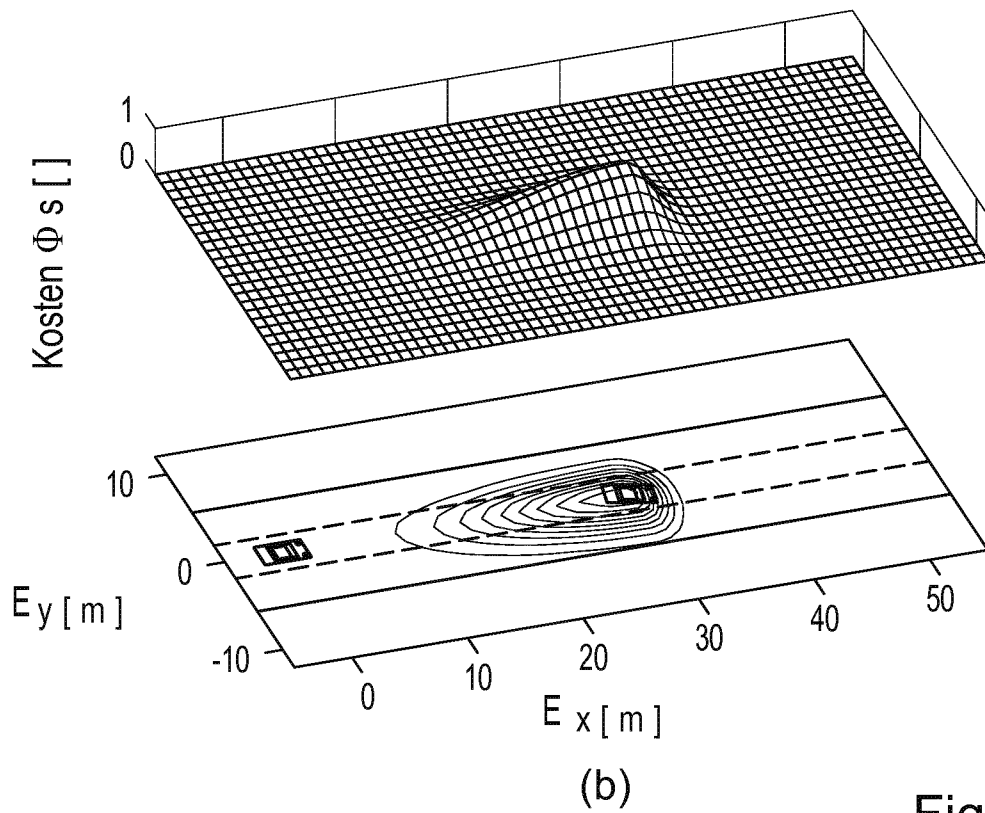


Fig. 3b

3/5

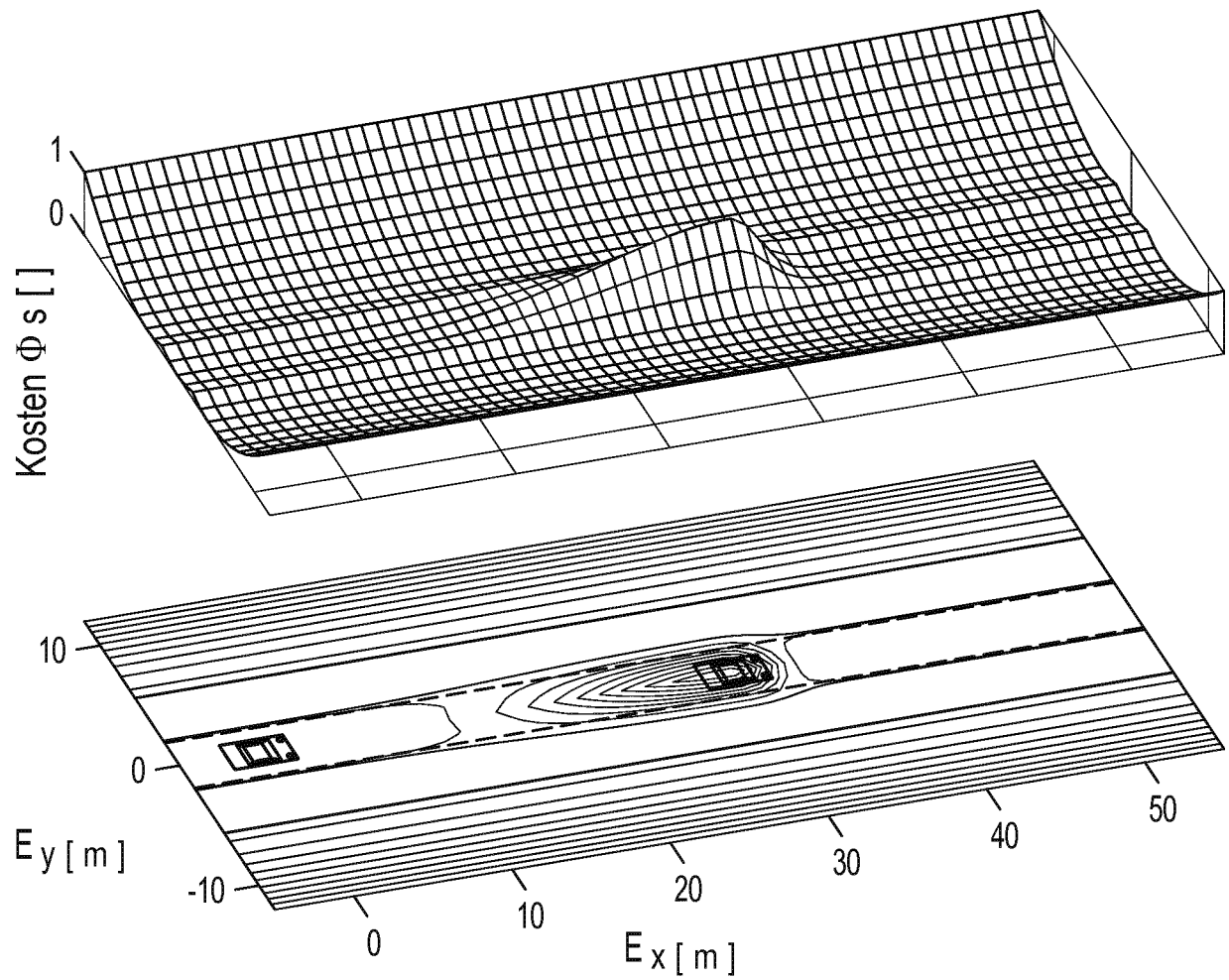


Fig. 4

	ID	E_x [m]	E_y [m]	F_v [km/h]	F_λ [°]
Egofahrzeug	0	0	- 3.75	120	0
Hindernisfahrzeug	1	60	- 3.15	85	0.1
Hindernisfahrzeug	2	90	- 3.75	57.0	0

Fig. 5

4/5

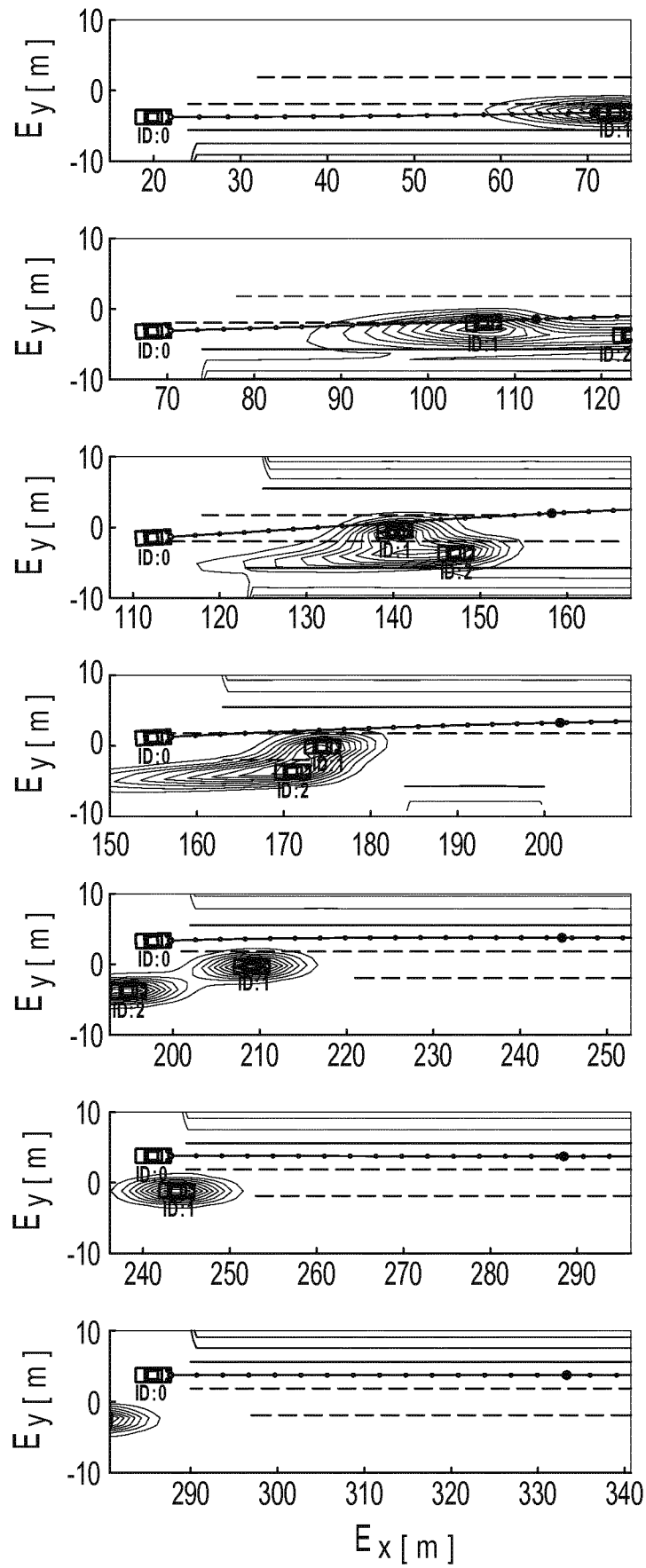


Fig. 6

5/5

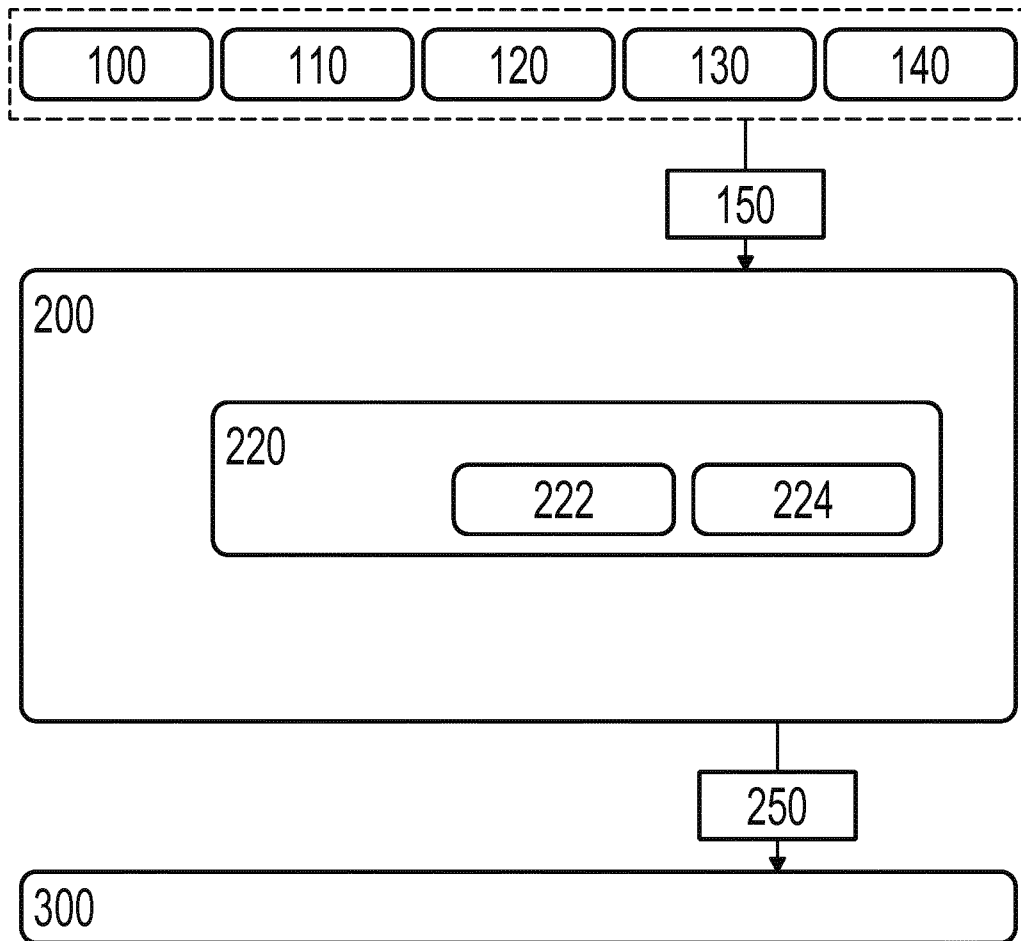


Fig. 7

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2019/066234

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**B60W 30/095**(2012.01)i; **B60W 50/00**(2006.01)i

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)

B60W

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, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 2015073663 A1 (NILSSON JULIA [SE] ET AL) 12 March 2015 (2015-03-12) paragraphs [0007] - [0010], [0013] - [0029], [0057] - [0062], [0074], [0075], [0089], [0090], [0094] - [0103], [0139] - [0144]; figures 2,7,8	1-10
X	DE 102016205442 A1 (BAYERISCHE MOTOREN WERKE AG [DE]) 05 October 2017 (2017-10-05) paragraphs [0007], [0009], [0010], [0021] - [0027]; figures 1,2	1,2,4,5,7,10
X	WENDA XU ET AL. "A real-time motion planner with trajectory optimization for autonomous vehicles" 2013 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION (ICRA); 6-10 MAY 2013; KARLSRUHE, GERMANY, US, 14 May 2012 (2012-05-14), pages 2061-2067 DOI: 10.1109/ICRA.2012.6225063 ISSN: 1050-4729, ISBN: 978-1-4673-5641-1. XP055629440 abstract paragraphs I.B, II.A, II.B,II.C, III.A, IV.A-C	1,2,4-8,10



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

08 October 2019

Date of mailing of the international search report

17 October 2019

Name and mailing address of the ISA/EP

European Patent Office
p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk
Netherlands

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

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

Authorized officer

Elbel, Benedikte

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2019/066234**C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	CHRISTIAN GÖTTE ET AL. "Spline-Based Motion Planning for Automated Driving" <i>IFAC-PAPERSONLINE</i> , DE, Vol. 50, No. 1, 31 December 2017 (2017-12-31), pages 9114-9119 DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.1709 ISSN: 2405-8963, XP055629563 abstract paragraphs 3.2,3.3,3.4 and 4	1,7,8
A	DE 102015221481 A1 (CONTINENTAL TEVES AG & CO OHG [DE]) 04 May 2017 (2017-05-04) paragraphs [0012], [0014]	2

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/EP2019/066234

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
US	2015073663	A1	12 March 2015	EP	2848487	A1	18 March 2015
				US	2015073663	A1	12 March 2015
DE	102016205442	A1	05 October 2017	NONE			
DE	102015221481	A1	04 May 2017	CN	108349501	A	31 July 2018
				DE	102015221481	A1	04 May 2017
				DE	112016003506	A5	17 May 2018
				EP	3371025	A1	12 September 2018
				JP	2019501811	A	24 January 2019
				KR	20180079303	A	10 July 2018
				US	2018251134	A1	06 September 2018
				WO	2017076405	A1	11 May 2017

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
 INV. B60W30/095 B60W50/00
 ADD.

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

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
 B60W

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, WPI Data

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	US 2015/073663 A1 (NILSSON JULIA [SE] ET AL) 12. März 2015 (2015-03-12) Absätze [0007] - [0010], [0013] - [0029], [0057] - [0062], [0074], [0075], [0089], [0090], [0094] - [0103], [0139] - [0144]; Abbildungen 2,7,8 -----	1-10
X	DE 10 2016 205442 A1 (BAYERISCHE MOTOREN WERKE AG [DE]) 5. Oktober 2017 (2017-10-05) Absätze [0007], [0009], [0010], [0021] - [0027]; Abbildungen 1,2 ----- -/-	1,2,4,5, 7,10



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

8. Oktober 2019

Absendedatum des internationalen Recherchenberichts

17/10/2019

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

Elbel, Benedikte

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	<p>WENDA XU ET AL: "A real-time motion planner with trajectory optimization for autonomous vehicles", 2013 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION (ICRA); 6-10 MAY 2013; KARLSRUHE, GERMANY, 14. Mai 2012 (2012-05-14), Seiten 2061-2067, XP055629440, US ISSN: 1050-4729, DOI: 10.1109/ICRA.2012.6225063 ISBN: 978-1-4673-5641-1 Zusammenfassung Abs. I.B, II.A, II.B, II.C, III.A, IV.A-C</p> <p>-----</p>	1,2,4-8, 10
X	<p>CHRISTIAN GÖTTE ET AL: "Spline-Based Motion Planning for Automated Driving", IFAC-PAPERSONLINE, Bd. 50, Nr. 1, 31. Dezember 2017 (2017-12-31), Seiten 9114-9119, XP055629563, DE ISSN: 2405-8963, DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.1709 Zusammenfassung Abs. 3.2,3.3,3.4 und 4</p> <p>-----</p>	1,7,8
A	<p>DE 10 2015 221481 A1 (CONTINENTAL TEVES AG & CO OHG [DE]) 4. Mai 2017 (2017-05-04) Absätze [0012], [0014]</p> <p>-----</p>	2

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2019/066234

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
US 2015073663 A1	12-03-2015	EP 2848487 A1	18-03-2015
		US 2015073663 A1	12-03-2015

DE 102016205442 A1	05-10-2017	KEINE	

DE 102015221481 A1	04-05-2017	CN 108349501 A	31-07-2018
		DE 102015221481 A1	04-05-2017
		DE 112016003506 A5	17-05-2018
		EP 3371025 A1	12-09-2018
		JP 2019501811 A	24-01-2019
		KR 20180079303 A	10-07-2018
		US 2018251134 A1	06-09-2018
		WO 2017076405 A1	11-05-2017
