

(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
26. Dezember 2024 (26.12.2024)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2024/260613 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:

B62D 5/04 (2006.01) G05B 19/04 (2006.01)
B60W 50/02 (2012.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2024/061303

(22) Internationales Anmeldedatum:
24. April 2024 (24.04.2024)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2023 205 723.9
19. Juni 2023 (19.06.2023) DE

(71) Anmelder: **VOLKSWAGEN AKTIENGESELLSCHAFT** [DE/DE]; Berliner Ring 2, 38440 Wolfsburg (DE).

(72) Erfinder: **WESCHE, Maximilian**; Braunschweiger Str. 25, 31234 Edemissen (DE). **FROHN, Christian**; Goslar-sche Straße 82, 38118 Braunschweig (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, 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)

(54) Title: METHOD FOR OPERATING A STEER-BY-WIRE STEERING SYSTEM AND STEER-BY-WIRE STEERING SYSTEM

(54) Bezeichnung: VERFAHREN ZUM BETREIBEN EINES STEER-BY-WIRE-LENKSYSTEMS UND STEER-BY-WIRE-LENKSYSTEM

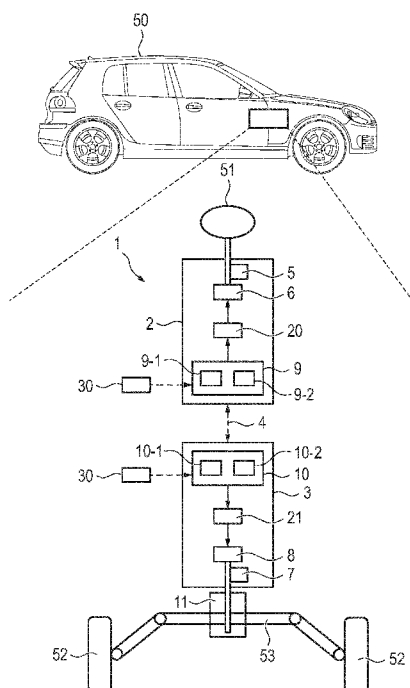


Fig. 1

(57) Abstract: The invention relates to a method for operating a steer-by-wire steering system (1), wherein the steer-by-wire steering system (1) has redundantly designed control paths, wherein if an error occurs in a main control path, there is switching from the main control path to a redundant control path and for this purpose the redundant control path is switched from a passive state to an active state, wherein a control variable (20, 21) in the redundant control path is estimated during a predefined transition phase based on measurement variables (30) of driving dynamics and a steering transmission (11). The invention also relates to a steer-by-wire steering system (1).

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Betreiben eines Steer-by-Wire-Lenksystems (1), wobei das Steer-by-Wire-Lenkssystem (1) redundant ausgelegte Regelpfade aufweist, wobei bei Auftreten eines Fehlers in einem Hauptregelpfad von dem Hauptregelpfad auf einen redundanten Regelpfad umgeschaltet wird und der redundante Regelpfad hierzu aus einem passiven Zustand in einen aktiven Zustand geschaltet wird, wobei eine Stellgröße (20, 21) im redundanten Regelpfad während einer vorgegebenen Überleitungsphase ausgehend von Messgrößen (30) einer Fahrdynamik und eines Lenkgetriebes (11) geschätzt wird. Ferner betrifft die Erfindung ein Steer-by-Wire-Lenkssystem (1).

WO 2024/260613 A1

Beschreibung

Verfahren zum Betreiben eines Steer-by-Wire-Lenksystems und Steer-by-Wire-Lenksystem

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Betreiben eines Steer-by-Wire-Lenksystems und ein Steer-by-Wire-Lenksystem.

Steer-by-Wire-(SbW)-Lenksysteme müssen eine deutlich höhere Ausfallsicherheit aufweisen als konventionelle elektromechanische Lenksysteme. Dies liegt daran, dass SbW-Lenksysteme über keine mechanische Verbindung zwischen Lenkhandhabe und Lenkgetriebe verfügen. Ein kompletter Ausfall des Lenksystems würde dazu führen, dass das Fahrzeug nicht mehr lenkbar wäre. Somit müssen ein kompletter Ausfall verhindert und Fehlerwirkungen frühzeitig erkannt werden. Ferner erfordern auch automatisiert fahrende Assistenzsysteme eine erhöhte Sicherheit an die Fahrzeugkomponenten.

Ein SbW-Lenksystem umfasst ein Lenkradmodul mit einem Rückkopplungs-Aktuator (engl. Force Feedback Actuator, FFA), welches einen gewünschten Lenkwinkel an der Lenkhandhabe erfasst und ein realistisches Rückkopplungsmoment (Handmoment) für den Fahrer erzeugt. Ferner umfasst das SbW-Lenksystem ein Lenkmodul mit einem Lenkgetriebe (engl. Road Wheel Actuator, RWA), welches den Fahrerwunsch in eine Radlenkbewegung umsetzt.

Um eine Fehlertoleranz des Gesamtsystems zu erhöhen, wird typischerweise die Regelung einer Aktorik, welche für die Positionsregelung im Lenkgetriebe (RWA) bzw. die Regelung des Drehmoments im Force-Feedback-Aktuator (FFA) zuständig ist, redundant ausgeführt. Die Aktorik verfügt insbesondere über mindestens zwei unabhängige Pfade zur Ansteuerung bzw. Regelung der Aktorik. Über eine heterogene Ausführung dieser Pfade kann die Fehlertoleranz gegenüber Common-Cause-Fehlern erhöht werden.

Fällt ein Hauptregelpfad aus, so muss eine Überleitung zu einem redundanten Regelpfad stattfinden und der Hauptregelpfad wird deaktiviert. Hierzu wird der redundante Regelpfad von einem passiven Zustand in einen aktiven Zustand überführt. Aufgrund des vorangehenden passiven Betriebs des redundanten Regelpfades und der hierdurch notwendigen Aktivierung kann es zu einer Stellgrößendifferenz kommen.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zu Grunde, ein Verfahren zum Betreiben eines Steer-by-Wire-Lenksystems und ein Steer-by-Wire-Lenksystem zu schaffen, bei denen eine Überleitung zwischen einem Hauptregelpfad und einem redundanten Regelpfad verbessert ist.

Die Aufgabe wird erfindungsgemäß durch ein Verfahren mit den Merkmalen des Patentanspruchs 1 und ein Steer-by-Wire-Lenksystem mit den Merkmalen des Patentanspruchs 9 gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung ergeben sich aus den Unteransprüchen.

Insbesondere wird ein Verfahren zum Betreiben eines Steer-by-Wire-Lenksystems zur Verfügung gestellt, wobei das Steer-by-Wire-Lenksystem redundant ausgelegte Regelpfade aufweist, wobei bei Auftreten eines Fehlers in einem Hauptregelpfad von dem Hauptregelpfad auf einen redundanten Regelpfad umgeschaltet wird und der redundante Regelpfad hierzu aus einem passiven Zustand in einen aktiven Zustand geschaltet wird, wobei eine Stellgröße im redundanten Regelpfad während einer vorgegebenen Überleitungsphase ausgehend von Messgrößen einer Fahrdynamik und eines Lenkgetriebes geschätzt wird.

Ferner wird insbesondere ein Steer-by-Wire-Lenksystem geschaffen, umfassend ein Lenkradmodul, das zum Erfassen einer Lenkvorgabe an einer Lenkhandhabe und zum Erzeugen eines Rückkopplungsmoments an der Lenkhandhabe eingerichtet ist, ein Lenkmodul, das zum Stellen eines Lenkwinkels an mindestens einem lenkbaren Rad ausgehend von der erfassten Lenkvorgabe und zum Bestimmen des Rückkopplungsmoments eingerichtet ist, und eine Kommunikationsverbindung zwischen dem Lenkradmodul und dem Lenkmodul, wobei das Lenkradmodul und/oder das Lenkmodul redundant ausgelegte Regelpfade aufweisen, wobei eine Steuereinrichtung des Lenkradmoduls und/oder eine Steuereinrichtung des Lenkmoduls dazu eingerichtet ist, bei Auftreten eines Fehlers in einem Hauptregelpfad von dem Hauptregelpfad auf einen redundanten Regelpfad umzuschalten und den redundanten Regelpfad hierzu aus einem passiven Zustand in einen aktiven Zustand zu schalten, und eine Stellgröße im redundanten Regelpfad während einer vorgegebenen Überleitungsphase ausgehend von Messgrößen einer Fahrdynamik und eines Lenkgetriebes zu schätzen.

Das Verfahren und das Steer-by-Wire-Lenksystem ermöglichen eine verbesserte Überleitung zwischen dem Hauptregelpfad und einem redundanten Regelpfad, wenn ein Fehler im Hauptregelpfad auftritt. Insbesondere kann eine Drehmomentlücke, die entstehen kann, weil der redundante Regelpfad aus einem passiven Zustand aktiviert wird und hierdurch am Anfang

noch keine der bisherigen Stellgröße des Hauptregelpfads entsprechende Stellgröße bereitstellen kann (d.h. insbesondere noch nicht eingeschwungen ist), während der Überleitungsphase gehandhabt und insbesondere verringert werden. Hierzu ist vorgesehen, dass eine Stellgröße im redundanten Regelpfad während der vorgegebenen Überleitungsphase ausgehend von Messgrößen einer Fahrdynamik und eines Lenkgetriebes geschätzt wird. Die geschätzte Stellgröße, insbesondere ein Drehmoment, wird dann als Stellgröße in dem redundanten Regelpfad gesetzt. Es ist hierdurch möglich, sofort nach dem Aktivieren des redundanten Regelpfades eine Stellgröße bereitzustellen. Ferner kann die Überleitung hierdurch für einen Fahrer komfortabler ausgestaltet werden, da insbesondere die beiden Extremfälle, das heißt eine maximale Stellgröße, insbesondere ein maximales Drehmoment, und eine Stellgröße von Null, insbesondere ein Drehmoment von Null, vermieden werden können.

Die Stellgröße ist insbesondere ein Drehmoment. Grundsätzlich kann die Stellgröße aber auch eine andere Größe sein, beispielsweise eine Kraft oder eine Spannung. Die Regelgröße ist insbesondere ein Winkel oder eine Position.

Eine Dauer der vorgegebenen Überleitungsphase ist insbesondere abhängig von einer Sprungantwort des jeweiligen (redundanten) Reglers. Die Sprungantwort ist ein Maß dafür, wie lange der Regler braucht, bis ein Einschwingvorgang nach dem Aktivschalten abgeklungen ist. Eine Dauer wird entsprechend gewählt (bei einer Einschwingzeit von 1 s beispielsweise ebenfalls 1 s). Ist eine Dauer der vorgegebenen Überleitungsphase abgelaufen, so wird die Stellgröße nicht mehr geschätzt, sondern von dem aktiv geschalteten redundanten Regler vorgegeben.

Teile des Steer-by-Wire-Lenksystems, insbesondere die Steuereinrichtung(en), können einzeln oder zusammengefasst als eine Kombination von Hardware und Software ausgebildet sein, beispielsweise als Programmcode, der auf einem Mikrocontroller oder Mikroprozessor ausgeführt wird. Es kann jedoch auch vorgesehen sein, dass Teile einzeln oder zusammengefasst als anwendungsspezifische integrierte Schaltung (ASIC) und/oder feldprogrammierbares Gatterfeld (FPGA) ausgebildet sind.

In einer Ausführungsform ist vorgesehen, dass für die Dauer der Überleitungsphase eine Stellgrößenbeschränkung im redundanten Regelpfad auf die geschätzte Stellgröße gesetzt wird. Hierdurch kann die Stellgröße schrittweise an die bei Auftreten des Fehlerfalls vorliegende Stellgröße im Hauptregelpfad herangeführt werden.

In einer Ausführungsform ist vorgesehen, dass das Schätzen und Setzen der Stellgröße während der Überleitungsphase wiederholt durchgeführt wird. Hierdurch kann wiederholt eine aktualisierte Stellgröße geschätzt und bereitgestellt werden. Insbesondere kann auf diese Weise auch die Stellgrößenbeschränkung schrittweise neu gesetzt und angepasst werden. Eine Drehmomentlücke kann hierdurch schrittweise geschlossen werden und der redundante Regelpfad kann hierdurch insbesondere schrittweise an den bei Auftreten des Fehlerfalls vorliegenden Wert der Stellgröße herangeführt werden.

In einer Ausführungsform ist vorgesehen, dass eine Reifenseitenkraft ausgehend von Messgrößen der Fahrdynamik und einem linearen Einspurmodell für ein Fahrzeug berechnet wird, wobei das Schätzen der Stellgröße ausgehend von der berechneten Reifenseitenkraft durchgeführt wird. Die Stellgröße ist hierbei insbesondere ein Drehmoment im Lenkmodul. Die Idee dahinter ist, dass auf ein Lenkgetriebe insbesondere zwei Kräfte wirken: eine Reifenseitenkraft und ein Drehmoment eines zum Stellen des mindestens einen lenkbaren Rades verwendeten Elektromotors. Die Reifenseitenkraft wird berechnet; das Drehmoment wird geschätzt und als Stellgröße verwendet.

In einer weiterbildenden Ausführungsform ist vorgesehen, dass die Reifenseitenkraft mittels eines quereschleunigungsabhängigen Faktors verringert wird. Hierdurch kann verhindert werden, dass ein Wert für die berechnete Reifenseitenkraft zu groß wird. Es hat sich gezeigt, dass das lineare Einspurmodell oberhalb einer Quereschleunigung von ca. $4,5 \text{ m/s}^2$ zu große Werte liefert, da dort die Modellannahmen nicht mehr gelten. In der Folge würde auch die basierend hierauf geschätzte Stellgröße, insbesondere ein geschätztes Drehmoment, zu groß werden. Um dies zu verhindern, wird die berechnete Reifenseitenkraft mittels des quereschleunigungsabhängigen Faktors verringert. Der Faktor kann beispielsweise ausgehend von einer, beispielsweise in der Steuereinrichtung hinterlegten, Kennlinie bestimmt werden, welche eine Abhängigkeit des Faktors von der Quereschleunigung beinhaltet. Die Werte und ein Verlauf der Kennlinie können beispielsweise ausgehend von komplexeren Fahrzeugmodellen bestimmt werden. Insbesondere sorgt der Faktor dafür, dass die Stellgröße, insbesondere das Drehmoment, abgeschwächt werden.

In einer Ausführungsform ist vorgesehen, dass das Schätzen der Stellgröße mittels eines Unknown Input Observers (UIO) erfolgt. Hierdurch können besonders gute Ergebnisse erzielt werden. Insbesondere wird hierbei davon ausgegangen, dass ein im Unknown Input Observer (UIO) verwendeter geschätzter Zustandsvektor des jeweils betrachteten Teils des Steer-by-

Wire-Lenksystems (Lenkradmodul oder Lenkmodul) gegen einen realen Zustandsvektor konvergiert. Insbesondere wird der Zustandsvektor mittels des UIO geschätzt; ausgehend von dem geschätzten Zustandsvektor wird dann die Stellgröße, insbesondere das Drehmoment, berechnet.

In einer weiterbildenden Ausführungsform ist vorgesehen, dass eine an einer Lenkhandhabe des Steer-by-Wire-Lenksystems erfasste Lenksollvorgabe als Eingang dem Unknown Input Observer (UIO) zugeführt wird.

In einer Ausführungsform ist vorgesehen, dass das Verfahren in einem Lenkradmodul und in einem Lenkmodul des Steer-by-Wire-Lenksystems zum Einsatz kommt. Hierdurch kann das Auftreten einer Abweichung der Stellgrößen, insbesondere einer Drehmomentlücke, sowohl im Lenkradmodul als auch im Lenkmodul verhindert werden.

Weitere Merkmale zur Ausgestaltung des Steer-by-Wire-Lenksystems ergeben sich aus der Beschreibung von Ausgestaltungen des Verfahrens. Die Vorteile des Steer-by-Wire-Lenksystems sind hierbei jeweils die gleichen wie bei den Ausgestaltungen des Verfahrens.

Ferner wird insbesondere auch ein Fahrzeug geschaffen, umfassend ein Steer-by-Wire-Lenksystem nach einer der beschriebenen Ausführungsformen. Das Fahrzeug ist insbesondere ein Kraftfahrzeug.

Nachfolgend wird die Erfindung anhand bevorzugter Ausführungsbeispiele unter Bezugnahme auf die Figuren näher erläutert. Hierbei zeigen:

Fig. 1 eine schematische Darstellung einer Ausführungsform des Steer-by-Wire-Lenksystems;

Fig. 2a, 2b schematische Darstellungen zur Verdeutlichung des Schätzens der Stellgröße.

Die Fig. 1 zeigt eine schematische Darstellung einer Ausführungsform des Steer-by-Wire-Lenksystems 1. Das Steer-by-Wire-Lenksystem 1 umfasst ein Lenkradmodul 2, ein Lenkmodul 3 und eine Kommunikationsverbindung 4 zwischen dem Lenkradmodul 2 und dem Lenkmodul 3. Das Steer-by-Wire-Lenksystem 1 ist insbesondere in einem Fahrzeug 50 angeordnet. Das Steer-by-Wire-Lenksystem 1 ist dazu eingerichtet, das in dieser Offenbarung

beschriebene Verfahren durchzuführen. Das Verfahren wird nachfolgend anhand des Steer-by-Wire-Lenksystems 1 näher beschrieben.

Das Lenkradmodul 2 ist zum Erfassen einer Lenkvorgabe an einer Lenkhandhabe 51 und zum Erzeugen eines Rückkopplungsmoments an der Lenkhandhabe 51 eingerichtet. Die Lenkvorgabe wird mittels eines Sensors 5 des Lenkradmoduls 2 erfasst. Das Rückkopplungsmoment wird mittels eines Elektromotors 6 des Lenkradmoduls 2 auf die Lenkhandhabe 51 aufgeprägt.

Das Lenkmodul 3 ist zum Stellen eines Lenkwinkels an mindestens einem lenkbaren Rad 52 ausgehend von der erfassten Lenkvorgabe und zum Bestimmen des Rückkopplungsmoments eingerichtet. Eine hierfür benötigte Zahnstangenposition einer Zahnstange 53 wird mittels eines Sensors 7 des Lenkmoduls 3 direkt oder indirekt erfasst. Die Lenkvorgabe wird mittels eines Elektromotors 8 des Lenkmoduls 3 auf die Zahnstange 53 und hierdurch auf die Räder 52 aufgeprägt. Dies erfolgt über ein Lenkgetriebe 11.

Die Lenkvorgabe und das Rückkopplungsmoment werden jeweils mittels der Kommunikationsverbindung 4 übermittelt.

Das Lenkradmodul 2 umfasst ferner eine Steuereinrichtung 9, welche zwei Regler 9-1, 9-2 bereitstellt, die eine redundante Regelung des Rückkopplungsmoments ermöglichen. Die zwei Regler 9-1, 9-2 sind hierbei insbesondere konzeptionell unterschiedlich ausgelegt, um Common-Cause-Fehler zu vermeiden (heterogene Auslegung). Die Regler 9-1, 9-2 können beide eine Stellgröße 20 bereitstellen, welche zur Umsetzung dem Elektromotor 6 zugeführt wird. Im normalen Betrieb wird insbesondere nur der Regler 9-1 als Hauptregelpfad verwendet, während der Regler 9-2 als redundanter Regelpfad passiv geschaltet ist und erst im Fehlerfall aktiviert wird.

Das Lenkmodul 3 umfasst ferner eine Steuereinrichtung 10, welche zwei Regler 10-1, 10-2 bereitstellt, die eine redundante Regelung der Zahnstangenposition ermöglichen. Die zwei Regler 10-1, 10-2 sind hierbei insbesondere konzeptionell unterschiedlich ausgelegt, um Common-Cause-Fehler zu vermeiden. Die Regler 10-1, 10-2 können beide eine Stellgröße 21 bereitstellen, welche zur Umsetzung dem Elektromotor 8 zugeführt wird. Im normalen Betrieb wird insbesondere nur der Regler 10-1 als Hauptregelpfad verwendet, während der Regler 10-2 als redundanter Regelpfad passiv geschaltet ist und erst im Fehlerfall aktiviert wird.

Die Steuereinrichtungen 9, 10 sind jeweils dazu eingerichtet, bei Auftreten eines Fehlers in dem Hauptregelpfad von dem Hauptregelpfad auf den redundanten Regelpfad umzuschalten und den redundanten Regelpfad hierzu aus einem passiven Zustand in einen aktiven Zustand zu schalten. Die Steuereinrichtung 9 schaltet den Regler 9-2 hierzu vom passiven in den aktiven Zustand und deaktiviert den Regler 9-1. Die Steuereinrichtung 10 schaltet den Regler 10-2 hierzu vom passiven in den aktiven Zustand und deaktiviert den Regler 10-1. Je nachdem, wo der Fehler auftritt, erfolgt dies nur in dem Lenkradmodul 2 oder nur in dem Lenkmodul 3 oder in beiden Modulen 2, 3.

Die Steuereinrichtungen 9, 10 sind ferner dazu eingerichtet, die jeweilige Stellgröße 20, 21 im redundanten Regelpfad während einer vorgegebenen Überleitungsphase ausgehend von Messgrößen 30 einer Fahrdynamik und des Lenkgetriebes 11 zu schätzen. Die Messgrößen 30 der Fahrdynamik werden beispielsweise von einer Fahrzeugsteuerung abgefragt und/oder bereitgestellt. Nach Ablauf einer Dauer der vorgegebenen Überleitungsphase wird die jeweilige Stellgröße 20, 21 vom redundanten Regelpfad, das heißt, von den Reglern 9-2, 10-2 zum Regeln verwendet.

Es kann vorgesehen sein, dass für die Dauer der Überleitungsphase eine Stellgrößenbeschränkung (d.h. ein Maximalwert für die Stellgröße) im redundanten Regelpfad auf die geschätzte Stellgröße 20, 21 gesetzt wird.

Es kann vorgesehen sein, dass das Schätzen und Setzen der Stellgröße 20, 21 während der Überleitungsphase wiederholt durchgeführt wird. Insbesondere kann vorgesehen sein, das Schätzen und Stellen in regelmäßigen Zeitintervallen zu wiederholen. Beispielsweise kann dies 10, 100, 1000, ... Mal während der Dauer der Überleitungsphase erfolgen.

Es kann vorgesehen sein, dass eine Reifenseitenkraft ausgehend von Messgrößen der Fahrdynamik und einem linearen Einspurmodell für ein Fahrzeug berechnet wird, wobei das Schätzen der Stellgröße ausgehend von der berechneten Reifenseitenkraft durchgeführt wird.

Weiterbildend kann vorgesehen sein, dass die Reifenseitenkraft mittels eines querbeschleunigungsabhängigen Faktors verringert wird. Der Faktor kann beispielsweise ausgehend von einer Kennlinie, die in den Steuereinrichtungen 9, 10 hinterlegt ist, bestimmt werden.

Es kann vorgesehen sein, dass das Schätzen der Stellgröße mittels eines Unknown Input Observers (UIO) erfolgt. Diese Ausführungsform ist schematisch anhand der Figuren 2a und 2b verdeutlicht und nachfolgend näher beschrieben.

Das Steer-by-Wire-Lenksystem 1 wird auf Seiten des Lenkmoduls 3 anhand eines Modells modelliert, das schematisch in der Fig. 2a dargestellt ist. Das Modell umfasst das Fahrzeug 50, das Lenkgetriebe 11 und den Elektromotor 8. Auf das Lenkgetriebe 11 wirken in dem Modell zwei Größen: die Reifenseitenkraft F_{yv} und das Drehmoment M_{Mot} des Elektromotors 8. Dieses Drehmoment M_{Mot} ist beim Aktivieren des redundanten Regelpfades als Stellgröße nicht bekannt und muss geschätzt werden (das geschätzte Drehmoment M_{Mot} wird dann verfahrensgemäß als Stellgröße im redundanten Regelpfad gesetzt). Ferner wirken folgende Einflussgrößen auf das Fahrzeug 50: die Zahnstangenposition x_{Zst} und die Fahrzeuggeschwindigkeit v .

Aus den Messgrößen des Lenkgetriebes 11 (das heißt im Beispiel insbesondere die Zahnstangenposition x_{Zst}) und der Fahrdynamik (das heißt im Beispiel insbesondere die Fahrzeuggeschwindigkeit v) soll das für den Fahrzeugzustand benötigte Drehmoment M_{Mot} geschätzt werden. Die nicht messbaren Größen des Lenkgetriebes 11 werden modellbasiert geschätzt. Die Reifenseitenkraft F_{yv} wird insbesondere aus den Messgrößen der Fahrdynamik und dem linearen Einspurmodell berechnet. In Abhängigkeit von einer Querbeschleunigung wird die Reifenseitenkraft F_{yv} insbesondere verringert, wie dies voranstehend bereits beschrieben wurde.

Die Grundlage für das Schätzen bildet eine Zustandsraumdarstellung der Regelstrecke:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= A \cdot x + B \cdot u \\ y &= C \cdot x + D \cdot u\end{aligned}$$

wobei x der Zustandsvektor (z.B. Rotorlage des Elektromotors 8, Rotorgeschwindigkeit, Zahnstangenposition, Zahnstangengeschwindigkeit), A die Systemmatrix, B die Eingangsmatrix und u die Eingangsgröße ist. C ist die Ausgangsmatrix und D die Durchgangsmatrix. Die Zustandsraumdarstellung repräsentiert als dynamisches Modell das Gesamtsystem (vgl. Fig. 2a). Das Gesamtsystem besteht im Beispiel aus dem Fahrzeug 50 und dem Lenkgetriebe 11. Das Fahrzeug 50 wird als lineares Einspurmodell modelliert, das Lenkgetriebe 11 beispielsweise als Zweimassenschwinger. Mit Hilfe der

Zustandsraumdarstellung kann ein dynamisches Verhalten des Gesamtsystems simuliert werden.

Die Fig. 2b verdeutlicht, wie das Schätzen durchgeführt wird. Gezeigt sind die Regelstrecke 40 und der Unknown Input Observer 41. Der Zustandsraum ergibt sich zu:

$$\dot{x} = A \cdot x + B \cdot u + D \cdot w$$

wobei w der nicht messbare bzw. unbekannte Eingang ist, vorliegend das Drehmoment M_{Mot} , das geschätzt werden soll. Weiter ergibt sich für den Zustandsraum:

$$\begin{aligned} y &= C \cdot x \\ \rightarrow \dot{y} &= C \cdot \dot{x} = C \cdot A \cdot x + C \cdot B \cdot u + C \cdot D \cdot w \end{aligned}$$

Für den Unknown Input Observer (UIO) ergibt sich ferner:

$$\dot{\hat{z}} = \hat{A} \cdot \hat{z} + \hat{B} \cdot u + L \cdot y$$

Hierbei korrespondieren $\hat{A}$ und $\hat{B}$ insbesondere nicht mehr mit eindeutig interpretierbaren physikalischen Größen, sondern werden im Rahmen der Auslegung des UIO vorgegeben bzw. gewählt.

Mit $\hat{z} = \hat{x} + E \cdot y$ ergibt sich:

$$\dot{\hat{x}} = \hat{A} \cdot \hat{x} + \hat{B} \cdot u + L \cdot y - E \cdot \dot{y}$$

L und E können hierbei (analog zu einem Luenberger-Beobachter) als Rückführungsmatrizen bezeichnet werden. $\hat{x}$ ist der geschätzte Zustandsvektor.

Mit $\dot{y} = C \cdot \dot{x} = C \cdot A \cdot x + C \cdot B \cdot u + C \cdot D \cdot w$ ergibt sich:

$$\dot{\hat{x}} = \hat{A} \cdot \hat{x} + \hat{B} \cdot u + L \cdot y - E \cdot C \cdot A \cdot x - E \cdot C \cdot B \cdot u - E \cdot C \cdot D \cdot w$$

Die Abweichung (Schätzfehler) $\dot{e} = \dot{x} - \dot{\hat{x}}$ entspricht:

$$\begin{aligned}\dot{e} &= A \cdot x + B \cdot u + D \cdot w - \hat{A} \cdot \hat{x} - \hat{B} \cdot u - L \cdot y + E \cdot C \cdot A \cdot x + E \cdot C \cdot B \cdot u + E \cdot C \cdot D \cdot w \\ \dot{e} &= A \cdot x + B \cdot u + D \cdot w - \hat{A} \cdot \hat{x} - \hat{B} \cdot u - L \cdot y + E \cdot C \cdot A \cdot x + E \cdot C \cdot B \cdot u + E \cdot C \cdot D \cdot w \\ \dot{e} &= x \cdot (A + E \cdot C \cdot A - L \cdot C) - \hat{A} \cdot \hat{x} + w \cdot (D + E \cdot C \cdot D) + u \cdot (B - \hat{B} + E \cdot C \cdot B)\end{aligned}$$

Der Schätzfehler soll unabhängig von dem unbekannten Eingang w (das heißt insbesondere von dem zu schätzenden Drehmoment M_{Mot}) sein, sodass:

$$\begin{aligned}D + E \cdot C \cdot D &= 0 \text{ und somit} \\ E &= -D \cdot (C \cdot D)^{-1}\end{aligned}$$

Der Schätzfehler soll weiterhin unabhängig von der Messgröße bzw. Eingangsgröße u (das heißt insbesondere von der Reifenseitenkraft F_{yv}) sein, sodass:

$$\begin{aligned}B - \hat{B} + E \cdot C \cdot B &= 0 \text{ und somit} \\ \hat{B} &= B + E \cdot C \cdot B\end{aligned}$$

Übrig bleibt ein Term, der unabhängig von der bekannten Messgröße u und der unbekannten Messgröße w ist:

$$\dot{e} = x \cdot (A + E \cdot C \cdot A - L \cdot C) - \hat{A} \cdot \hat{x}$$

Die Matrix $\hat{A}$ wird derart gewählt, dass der Schätzfehler nur von dieser Matrix abhängt:

$$\hat{A} = A + E \cdot C \cdot A - L \cdot C$$

Der Schätzfehler ergibt sich schließlich zu:

$$\dot{e} = \hat{A} \cdot e$$

Falls also die Eigenwerte von $\hat{A}$ negative Realteile haben, konvergiert hierbei der Schätzfehler gegen 0. Die Eigenwerte können frei gewählt werden, wenn das Kriterium für vollständige Beobachtbarkeit nach Kalman erfüllt ist.

Der unbekannte Eingang w des UIO, das heißt das Motormoment M_{Mot} , wird so errechnet, dass der Schätzfehler $\dot{e}$ minimiert wird. Der Schätzfehler besteht hier zwischen den gemessenen

Zustandsgrößen (ausgedrückt im Zustandsvektor y , welcher beispielsweise eine Zahnstangenposition, eine Zahnstangengeschwindigkeit, eine Rotorlage und/oder eine Rotorgeschwindigkeit umfasst) und modellierten Zustandsgrößen des Lenkgetriebes 11. Es wird hierbei insbesondere die Annahme getroffen, dass ein Ist-Wert der gemessenen Zustandsgrößen einer Lenksollvorgabe entspricht (z.B. wird eine Ist-Position der Zahnstange gleichgesetzt mit einer Soll-Position, wie diese sich aus einer Lenksollvorgabe des Fahrers an der Lenkhandhabe ergibt), das heißt, es wird die Annahme getroffen, dass die Sollgröße sofort und ohne Verzögerung in die Istgröße umgesetzt wird. Anders ausgedrückt: Verschwindet der Schätzfehler $e = x - \hat{x}$, so kann der unbekannte Eingang w und somit das Motomoment M_{Mot} anhand der voranstehenden Gleichungen berechnet (geschätzt) werden.

Insbesondere ist vorgesehen, dass eine an einer Lenkhandhabe 51 des Steer-by-Wire-Lenksystems 1 erfasste Lenksollvorgabe als Eingang dem Unknown Input Observer (UIO) zugeführt wird (hier in Form des Zustandsvektors y).

Das geschätzte Drehmoment, das heißt das Motormoment M_{Mot} , enthält hierdurch zwar die Modellungenauigkeiten und Störgrößen, die Drehmomentlücke kann hierdurch dennoch verringert bzw. schrittweise geschlossen werden. Geschätzt wird hierbei dasjenige Drehmoment, das nötig wäre, damit die modellbasierten Zustandsgrößen des Lenkgetriebes 11 den realen Zustandsgrößen entsprechen. Das Ergebnis ist ein modellbasiertes Drehmoment, mit dem ein Drehmomentabfall nach dem Aktivieren des redundanten Regelpfades während der Überleitungsphase abgeschwächt werden kann.

Das Beispiel wurde anhand des Lenkmoduls 3 beschrieben. In gleicher Weise kann das Schätzen auch für eine Drehmomentregelung für das Rückkopplungsmoment (Handmoment) im Lenkradmodul 2 erfolgen. Soll eine andere Größe als Stellgröße gestellt werden, so erfolgt das Schätzen in grundsätzlich analoger Weise.

Die in der Fig. 1 gezeigte Ausführungsform sieht vor, dass das Verfahren in einem Lenkradmodul 2 und in einem Lenkmodul 3 des Steer-by-Wire-Lenksystems 1 zum Einsatz kommt. Es kann grundsätzlich jedoch auch vorgesehen sein, dass das Verfahren nur in dem Lenkradmodul 2 oder nur in dem Lenkmodul 3 zum Einsatz kommt.

Bezugszeichenliste

1	Steer-by-Wire-Lenksystem
2	Lenkradmodul
3	Lenkmodul
4	Kommunikationsverbindung
5	Sensor
6	Elektromotor
7	Sensor
8	Elektromotor
9	Steuereinrichtung
9-1	Regler (Hauptpfad)
9-2	Regler (redundanter Pfad)
10	Steuereinrichtung
10-1	Regler (Hauptpfad)
10-2	Regler (redundanter Pfad)
11	Lenkgetriebe
20	Stellgröße (Lenkradmodul)
21	Stellgröße (Lenkmodul)
40	Regelstrecke
41	Unknown Input Observer (UIO)
50	Fahrzeug
51	Lenkhandhabe
52	lenkbares Rad
53	Zahnstange
A	Systemmatrix
B	Eingangsmatrix
C	Ausgangsmatrix
D	Durchgangsmatrix
F_{yv}	Reifenseitenkraft
M_{Mot}	Drehmoment
u	Eingangsgröße
v	Fahrzeuggeschwindigkeit

w	nicht messbarer/unbekannter Eingang (wird geschätzt)
x	Zustandsvektor (Soll)
x_{Zst}	Zahnstangenposition
y	Zustandsvektor (Ist)

Ansprüche

1. Verfahren zum Betreiben eines Steer-by-Wire-Lenksystems (1), wobei das Steer-by-Wire-Lenkssystem (1) redundant ausgelegte Regelpfade aufweist, wobei bei Auftreten eines Fehlers in einem Hauptregelpfad von dem Hauptregelpfad auf einen redundanten Regelpfad umgeschaltet wird und der redundante Regelpfad hierzu aus einem passiven Zustand in einen aktiven Zustand geschaltet wird, wobei eine Stellgröße (20,21) im redundanten Regelpfad während einer vorgegebenen Überleitungsphase ausgehend von Messgrößen (30) einer Fahrdynamik und eines Lenkgetriebes (11) geschätzt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass für die Dauer der Überleitungsphase eine Stellgrößenbeschränkung im redundanten Regelpfad auf die geschätzte Stellgröße (20,21) gesetzt wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass das Schätzen und Setzen der Stellgröße (20,21) während der Überleitungsphase wiederholt durchgeführt wird.
4. Verfahren nach einem der vorangegangenen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass eine Reifenseitenkraft (F_{yv}) ausgehend von Messgrößen (30) der Fahrdynamik und einem linearen Einspurmodell für ein Fahrzeug (50) berechnet wird, wobei das Schätzen der Stellgröße (20,21) ausgehend von der berechneten Reifenseitenkraft (F_{yv}) durchgeführt wird.
5. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Reifenseitenkraft (F_{yv}) mittels eines querbeschleunigungsabhängigen Faktors verringert wird.
6. Verfahren nach einem der vorangegangenen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das Schätzen der Stellgröße (20,21) mittels eines Unknown Input Observers (41) erfolgt.
7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass eine an einer Lenkhandhabe (51) des Steer-by-Wire-Lenksystems (1) erfasste Lenksollvorgabe als Eingang dem Unknown Input Observer (41) zugeführt wird.

8. Verfahren nach einem der vorangegangenen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das Verfahren in einem Lenkradmodul (2) und in einem Lenkmodul (3) des Steer-by-Wire-Lenksystems (1) zum Einsatz kommt.
9. Steer-by-Wire-Lenksystem (1), umfassend:
 - ein Lenkradmodul (2), eingerichtet zum Erfassen einer Lenkvorgabe an einer Lenkhandhabe (51) und zum Erzeugen eines Rückkopplungsmoments an der Lenkhandhabe (51),
 - ein Lenkmodul (3), eingerichtet zum Stellen eines Lenkwinkels an mindestens einem lenkbaren Rad (63) ausgehend von der erfassten Lenkvorgabe und zum Bestimmen des Rückkopplungsmoments, und
 - eine Kommunikationsverbindung (4) zwischen dem Lenkradmodul (2) und dem Lenkmodul (3),
 - wobei das Lenkradmodul (2) und/oder das Lenkmodul (3) redundant ausgelegte Regelpfade aufweisen,
 - wobei eine Steuereinrichtung (9) des Lenkradmoduls (2) und/oder eine Steuereinrichtung (10) des Lenkmoduls (3) dazu eingerichtet ist,
 - bei Auftreten eines Fehlers in einem Hauptregelpfad von dem Hauptregelpfad auf einen redundanten Regelpfad umzuschalten und den redundanten Regelpfad hierzu aus einem passiven Zustand in einen aktiven Zustand zu schalten, und
 - eine Stellgröße (20,21) im redundanten Regelpfad während einer vorgegebenen Überleitungsphase ausgehend von Messgrößen (30) einer Fahrdynamik und eines Lenkgetriebes (11) zu schätzen.
10. Fahrzeug (50), umfassend ein Steer-by-Wire-Lenksystem (1) nach Anspruch 9.

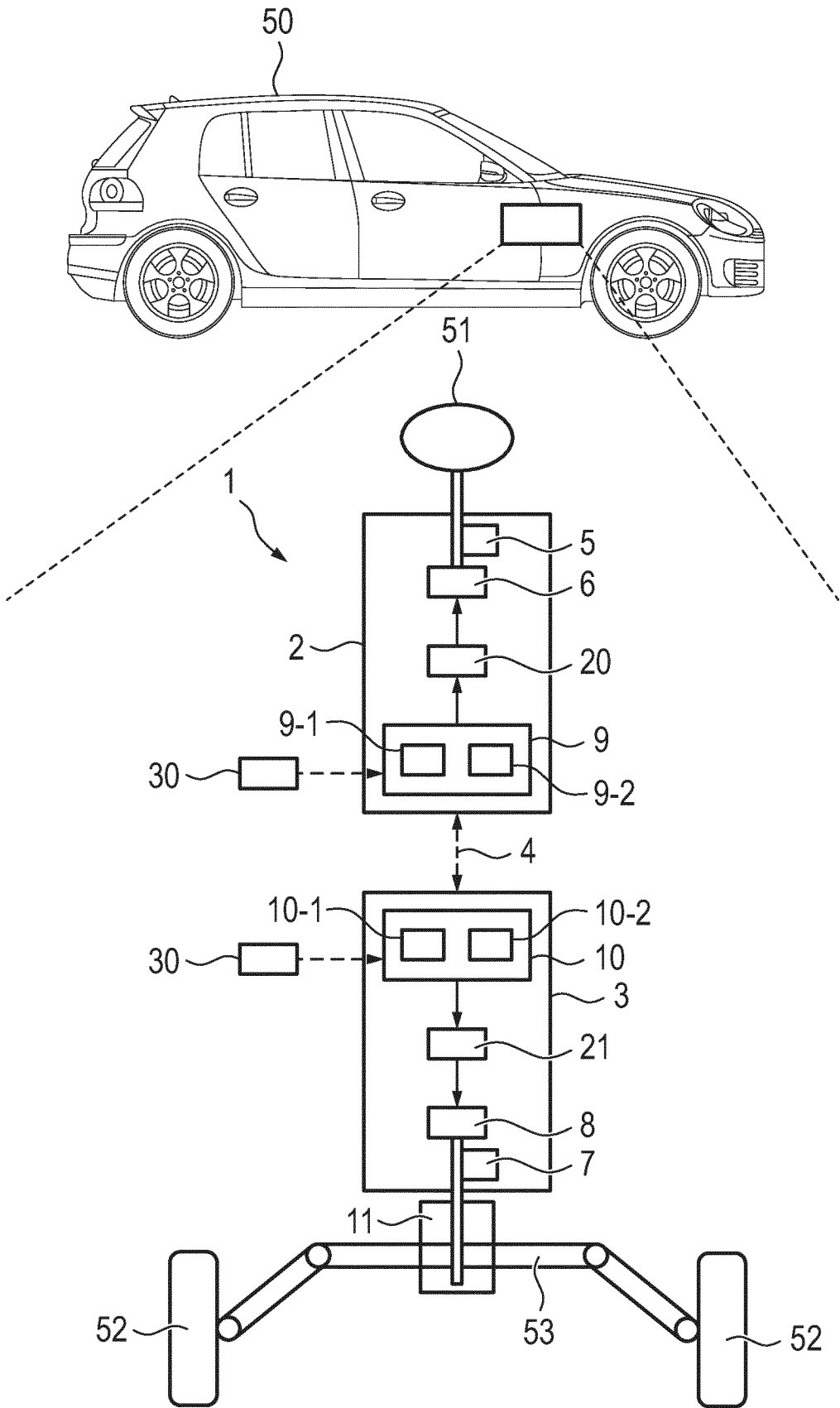
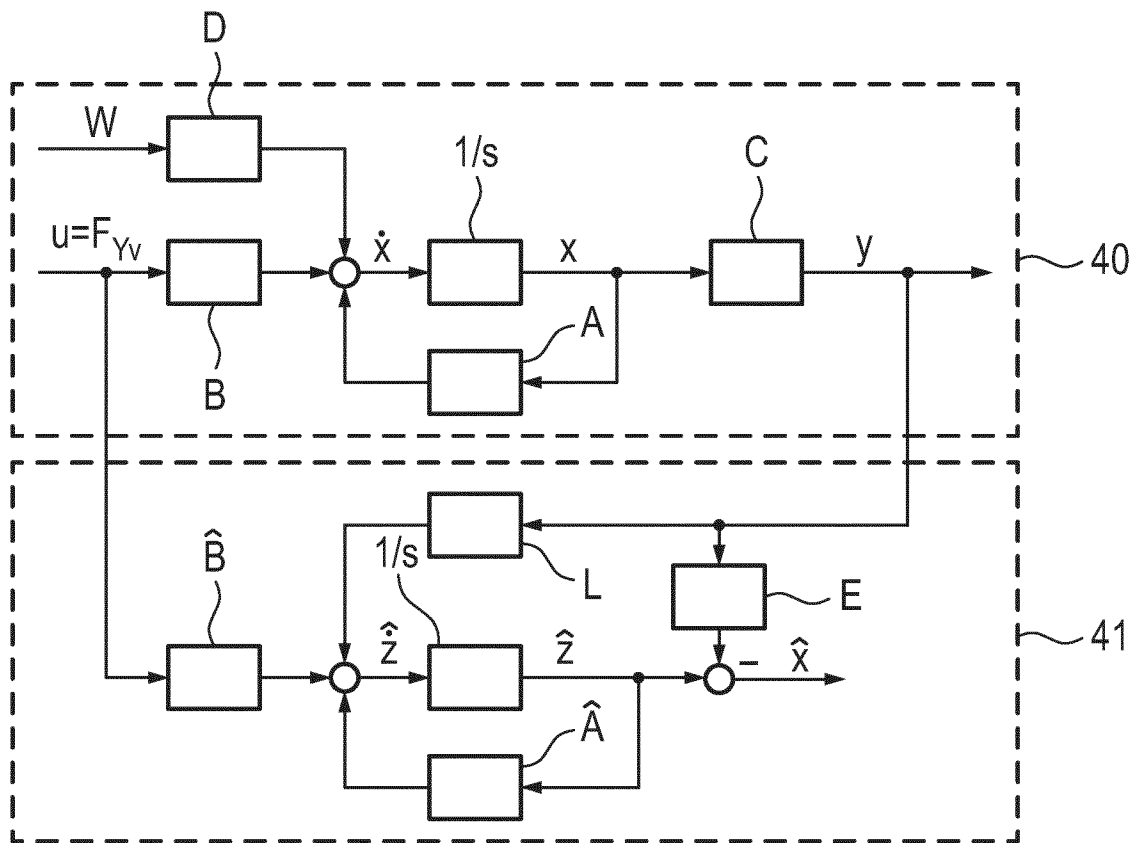
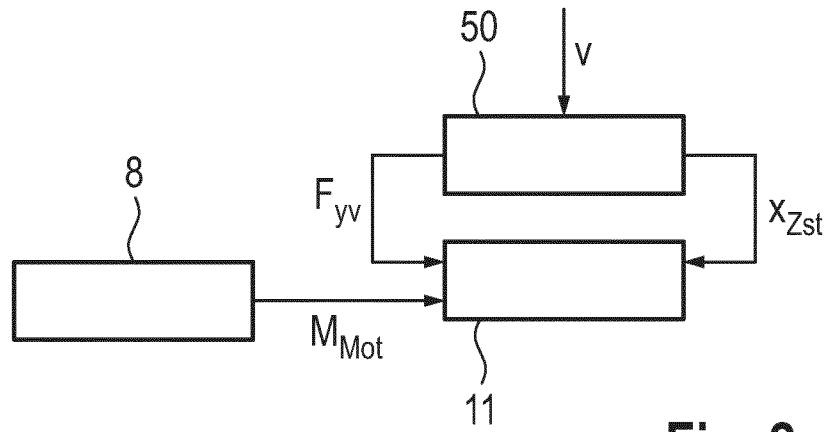


Fig. 1



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2024/061303

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**B62D 5/04**(2006.01)i; **B60W 50/02**(2012.01)i; **G05B 19/04**(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)

B62D; B60W; G06F; G05B

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	CN 115384490 B (BEIJING JIDU TECH CO LTD) 30 December 2022 (2022-12-30) claim 1	1-3, 6-10
A	DE 10101827 A1 (DAIMLER CHRYSLER AG [DE]) 18 July 2002 (2002-07-18) claim 1	1,9
A	DE 102013020177 A1 (DAIMLER AG [DE]) 18 June 2014 (2014-06-18) paragraph [0012] paragraph [0015]	1,9

☐ 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

15 September 2024

Date of mailing of the international search report

24 September 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

Pemberton, Paul

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/EP2024/061303

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
CN	115384490	B	30 December 2022	NONE	
DE	10101827	A1	18 July 2002	DE 10101827 A1	18 July 2002
				FR 2819474 A1	19 July 2002
				US 2002092696 A1	18 July 2002
DE	102013020177	A1	18 June 2014	NONE	

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES INV. B62D5/04 B60W50/02 G05B19/04 ADD.		
Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC		
B. RECHERCHIERTE GEBIETE Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole) B62D B60W G06F G05B		
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	CN 115 384 490 B (BEIJING JIDU TECH CO LTD) 30. Dezember 2022 (2022-12-30) Anspruch 1 -----	1-3,6-10
A	DE 101 01 827 A1 (DAIMLER CHRYSLER AG [DE]) 18. Juli 2002 (2002-07-18) Anspruch 1 -----	1,9
A	DE 10 2013 020177 A1 (DAIMLER AG [DE]) 18. Juni 2014 (2014-06-18) Absatz [0012] Absatz [0015] -----	1,9
☐ 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 15. September 2024		Absendedatum des internationalen Recherchenberichts 24/09/2024
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 Pemberton, Paul

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2024/061303

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
CN 115384490	B	30-12-2022	KEINE
DE 10101827	A1	18-07-2002	DE 10101827 A1 18-07-2002
		FR 2819474 A1	19-07-2002
		US 2002092696 A1	18-07-2002
DE 102013020177 A1	18-06-2014	KEINE	