

①9



SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT
BUNDESAMT FÜR GEISTIGES EIGENTUM

①1 CH 667 930 A5

⑤1 Int. Cl.4: G 05 D 1/02
G 05 D 1/12
B 60 K 41/00

Erfindungspatent für die Schweiz und Liechtenstein

Schweizerisch-liechtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

①2 PATENTSCHRIFT A5

②1 Gesuchsnummer: 248/86

②2 Anmeldungsdatum: 19.10.1984

③0 Priorität(en): 16.05.1984 GB 8412425

②4 Patent erteilt: 15.11.1988

④5 Patentschrift
veröffentlicht: 15.11.1988

⑦3 Inhaber:
The General Electric Company, p.l.c., London
W1A 1EH (GB)

⑦2 Erfinder:
Reeve, Peter Joseph, Rugby/Warwicks (GB)
Robins, Michael Philip, Rugby/Warwicks (GB)
Roberts, Malcolm Thomas, Coventry/West
Midlands (GB)

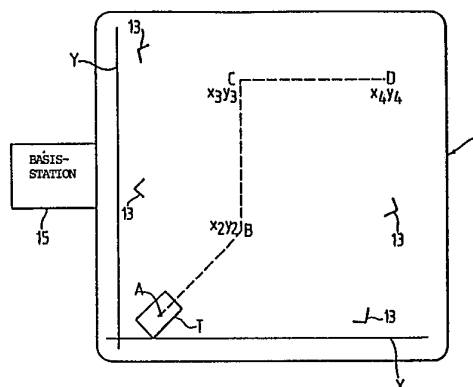
⑦4 Vertreter:
Bovard AG, Bern 25

⑧6 Internationale Anmeldung: PCT/GB 84/00352
(En)

⑧7 Internationale Veröffentlichung: WO 85/05474
(En) 05.12.1985

⑤4 Fahrzeugsteuerungs- und -leitanlage.

⑤7 Bei der Fahrzeugsteuerungs- und -leitanlage wird eine gewünschte Bahn des Fahrzeugs (T) in Form von Koordinaten (x, y) in einem Bodenbezugsrahmen gespeichert. Die "Vektoren" zwischen diesen Übergangspunkten werden durch aufeinanderfolgende Bezugspunkte in inkrementelle Vektoren unterteilt, wobei die Bezugspunkte in regelmässigen Abschnitten vor dem Fahrzeug (T) erzeugt werden. Eine Koppelnavigationseinrichtung sagt die Position des Fahrzeugs am Ende jedes Abschnitts voraus, und dieser Schätzwert wird mittels eines Kalman-Filters durch eine unabhängige Festzielfeststelleinrichtung, das einen Abtastlaser aufweist, korrigiert. Der Fehler zwischen der geschätzten Fahrzeugposition und dem örtlichen inkrementellen Vektor bewirkt eine Lenkwinkelkorrektur für das Fahrzeug, (T) und die Fahrzeuggeschwindigkeit ist von der Verzögerung des Fahrzeugs gegenüber der Bildung der Bezugspunkte abhängig.



PATENTANSPRÜCHE

1. Fahrzeugsteuerungs- und -leitanlage mit einem einen Bewegungsantrieb (3, 7) aufweisenden Fahrzeug, einer Lenkeinrichtung (5, 9) zum Steuern des Fahrzeugs längs einer Bahn, einer Koppelnavigationseinrichtung (35, 39) zum Berechnen der Position und des Kurses des Fahrzeugs auf inkrementeller Basis, einer Einrichtung (19) zum Vorgeben einer gewünschten Bahn (ABC) des Fahrzeugs, einer Einrichtung (29) zum Steuern des Fahrzeugbewegungsantriebs und Lenkmittel (3, 5, 7, 9) zum Führen des Fahrzeugs entlang der gewünschten Bahn, einer Einrichtung (43) zum Vorausberechnen des Peilwinkels des Zieles (13) aus der berechneten Position und der Bahn des Fahrzeugs, einer elektromagnetischen Peileinrichtung (33) zum Ermitteln des Peilwinkels des Bezugszieles (13), relativ zum Fahrzeug, einer Einrichtung (45) zum Vergleichen des ermittelten Peilwinkels (θ_i) mit dem vorausbestimmten Peilwinkel (θ_i) und einer Einrichtung (47, 49) zum Korrigieren der Steuerung des Fahrzeugbewegungsantriebs und der Lenkung des Fahrzeugs in Abhängigkeit des Peilwinkelfehlers ($\theta_i - \theta_i$).

2. Anlage nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Einrichtung (47, 49) zum Korrigieren der Steuerung eine Kalman-Filtereinrichtung (37) zur Bildung von Korrekturprodukten umfasst, bei denen es sich um Produkte aus dem Peilwinkelfehler und Kalman-Verstärkungsfaktoren bei allen Positionskoordinaten und dem Fahrzeugkurs handelt, und eine Einrichtung zum Summieren der Korrekturprodukte und der jeweiligen Schätzwerte der Position und des Kurses, die durch die Koppelnavigationseinrichtung (35, 39) abgegeben werden, wobei die Summen die besten Schätzwerte der Position und des Kurses des Fahrzeugs bilden.

3. Anlage nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Einrichtung (19) zum Vorgeben der gewünschten Bahn (AB-CD) eine Speichereinrichtung (21) zum Speichern der Bahn in Form einer Folge geradliniger Segmente (EF) und eine Einrichtung (23) zum Umwandeln des Übergangs der geradlinigen Segmente (EF) in stetig gekrümmte Übergangsegmente aufweist.

4. Anlage nach Anspruch 3, gekennzeichnet durch eine Einrichtung (27) zum Speichern der zulässigen maximalen Fahrzeuggeschwindigkeit und der zulässigen Bahnbreite für jedes gerade und gekrümmte Segment in Abhängigkeit von den örtlichen Bahnbedingungen.

5. Anlage nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Einrichtung (23) zum Umwandeln des Übergangs in gekrümmte Übergangsegmente eine Einrichtung zum Berechnen des Radius (r_a , r_b) der Krümmung eines gekrümmten Segments als nicht weniger als die Hälfte des Wertes der Bahnbreite (pw_a) und, wenn verschiedene Bahnbreiten an dem Übergang (E) vorhanden sind, die Hälfte des Wertes der grösseren der beiden Bahnbreiten aufweist.

6. Anlage nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Koppelnavigationseinrichtung (35, 39) eine Einrichtung zum Abschätzen der Position und des Kurses des Fahrzeugs nach jeder Folge von Zeit- und Weginkrementen von der Position und dem Kurs des Fahrzeugs am Anfang des Inkrements aus und in Abhängigkeit von der Vorwärts- und Drehbewegung des Fahrzeugs während dieses Inkrements aufweist.

7. Anlage nach Anspruch 6, gekennzeichnet durch einen Zielpelungsprädiktor (25) zum Vorhersagen des Peilwinkels eines der Bezugsziele von dem Fahrzeug aus auf der Basis der abgeschätzten Position des Fahrzeugs und der zuletzt bestimmten Position des Bezugszieles.

8. Anlage nach Anspruch 2, gekennzeichnet durch eine Einrichtung (33) zur Eingabe der besten Schätzwerte in die Koppelnavigationseinrichtung (35, 39) als Basis, auf der der Schätzwert der Fahrzeugposition und des Fahrzeugkurses beim nächsten Inkrement ermittelt wird.

9. Anlage nach einem der Ansprüche 3, 4 oder 5, gekennzeichnet durch eine Einrichtung (25) zum sequentiellen Erzeu-

gen der Koordination inkrementeller Bezugspunkte auf den Segmenten, die inkrementelle Vektoren definieren, wobei der Abstand zwischen diesen Punkten gleich dem Produkt der maximal zulässigen Geschwindigkeit für dieses Segment und einem Basiszeitinkrement ist.

10. Anlage nach Anspruch 2, gekennzeichnet durch eine Einrichtung (27) zum Speichern einer zulässigen Maximalfahrzeuggeschwindigkeit und einer zulässigen Bahnbreite für jedes der gerad- und krummlinigen Segmente in Abhängigkeit von örtlichen Bahnbedingungen, eine Einrichtung (25) zum sequentiellen Erzeugen der Koordinaten inkrementeller Bezugspunkte auf den Segmenten, die inkrementelle Vektoren definieren, wobei der Abstand zwischen diesen Punkten gleich dem Produkt aus einem Basiszeitinkrement ist, eine Zielfehlerfeststelleinrichtung (33) zum Vergleichen der besten Schätzwerte der Fahrzeugposition und des Kurses mit der Position und dem Kurs des nächsten inkrementellen Vektors und zum Erzeugen von Weg- und Kursfehlersignalen und eine Einrichtung (28) zum Erzeugen eines Lenkwinkelsollwertsignals in Abhängigkeit von den Weg- und Kursfehlersignalen.

11. Anlage nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass die Zielfehlerfeststelleinrichtung (33) eine Einrichtung zum Transformieren der Koordinaten der besten Schätzwerte der Fahrzeugposition und des Kurses in einen Bezugsrahmen mit einer Koordinatenachse, die mit einem örtlichen inkrementellen Vektor zusammenfällt und einen Nullpunkt aufweist, der mit dem Bezugspunkt zusammenfällt, zu dem der örtliche inkrementelle Vektor gerichtet ist, aufweist.

12. Anlage nach Anspruch 10 oder 11, gekennzeichnet durch eine Einrichtung (30) zum Bilden eines Geschwindigkeitsollwertsignals für das Fahrzeug (T) in Abhängigkeit von der Anzahl der Bezugspunkte, die vor der Fahrzeugposition erzeugt werden.

13. Anlage nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Peileinrichtung (33) eine Laserstrahlquelle (11), die eine azimutale Abtastung bewirkt und eine Einrichtung zum Feststellen des Peilwinkels eines Zielreflektors relativ zum Kurs des Fahrzeugs (T) anhand der Richtung des reflektierten Strahls aufweist.

BESCHREIBUNG

Die Erfindung bezieht sich auf eine Fahrzeugsteuerungs- und -leitanlage gemäss dem Oberbegriff des Patentanspruches 1.

Obwohl die Position eines Fahrzeugs an bestimmten Standorten durch an Bord befindliche Fühler und externe Positionsmarkierungen genau bestimmt werden kann, ergeben sich Schwierigkeiten bei dem Versuch, die Bewegung des Fahrzeugs auf stetige (weiche) und ökonomische Weise genau zu steuern. Im allgemeinen kann sich ein unbemanntes Fahrzeug nur auf einer vorbestimmten Bahn bewegen, indem entweder feste Schienen verwendet werden, an denen die Räder anliegen, oder Kabel, die unter der einzuhaltenden Bahn eingegraben sind. Derartige Einrichtungen mit Schienen oder Kabel sind kostspielig und unzuverlässig dauerhaft, weil die Bahnen dadurch ein für allemal festliegen.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine Fahrzeugsteuerungs- und -leitanlage für ein freimanövrierbares unbemanntes Fahrzeug anzugeben, das eine manuelle Lenkung eines Fahrzeugs auf einer gewünschten Bahn ermöglicht.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäss durch die kennzeichnenden Merkmale des Patentanspruches 1 gelöst.

Vorzugsweise ist dafür gesorgt, dass die Einrichtung zum Vorgeben einer gewünschten Bahn eine Speichereinrichtung

zum Speichern der Bahn in Form einer Folge geradliniger Segmente und eine Einrichtung zum Umwandeln des Übergangs der geradlinigen Segmente in stetig (weich) gekrümmte Übergangsegmente aufweist.

Ferner kann eine Einrichtung zum Speichern einer zulässigen maximalen Fahrzeuggeschwindigkeit und einer zulässigen Bahnbreite für jedes gerade und gekrümmte Segment in Abhängigkeit von den örtlichen Bahnbedingungen vorgesehen sein.

Die Koppelnavigationseinrichtung kann eine Einrichtung zum Abschätzen der Position und des Kurses des Fahrzeugs nach jeder Folge von Zeit- und Weginkrementen von der Position und dem Kurs des Fahrzeugs am Anfang des Inkrements aus und in Abhängigkeit von der Vorwärts- und Drehbewegung des Fahrzeugs während dieses Inkrements aufweisen.

Vorzugsweise weist das System eine Einrichtung zum Vorhersagen des Peilwinkels eines der Bezugsziele von dem Fahrzeug aus auf der Basis der abgeschätzten Position des Fahrzeugs und der zuletzt bestimmten Position des Bezugszieles auf.

Vorzugsweise ist eine Einrichtung zur Eingabe der besten Schätzwerte in die Koppelnavigationseinrichtung als Basis, auf der der Schätzwert der Fahrzeugposition und des Fahrzeugkurses beim nächsten Inkrement ermittelt wird, vorgesehen.

Ferner kann eine Einrichtung zum sequentiellen Erzeugen der Koordinaten inkrementeller Bezugspunkte auf den Segmenten, die inkrementelle Vektoren definieren, wobei der Abstand zwischen diesen Punkten gleich dem Produkt der maximal zulässigen Geschwindigkeit für dieses Segment und einem Basiszeitinkrement ist, vorgesehen sein. Ausserdem kann eine Fehlerfeststelleinrichtung zum Vergleichen der besten Schätzwerte der Fahrzeugposition und des Kurses mit der Position und dem Kurs des nächsten inkrementellen Vektors und zum Erzeugen von Weg- und Kursfehlersignalen und eine Einrichtung zum Erzeugen eines Lenkwinkelsollwertsignals in Abhängigkeit von den Weg- und Kursfehlersignalen vorgesehen sein.

Sodann kann dafür gesorgt sein, dass die Feststelleinrichtung eine Einrichtung zum Transformieren der Koordinaten der besten Schätzwerte der Fahrzeugposition und des Kurses in einen Bezugsrahmen mit einer Koordinatenachse, die mit einem örtlichen inkrementellen Vektor zusammenfällt und einen Nullpunkt aufweist, der mit dem Bezugspunkt zusammenfällt, zu dem der örtliche inkrementelle Vektor gerichtet ist, aufweist.

Ein Geschwindigkeitssollwertsignal für das Fahrzeug kann von der Anzahl der Bezugspunkte abhängig gemacht werden, die vor der Fahrzeugposition erzeugt werden.

Nachstehend wird ein bevorzugtes Ausführungsbeispiel eines erfindungsgemässen Fahrzeugsteuerungs- und -leitsystems anhand der Zeichnung näher beschrieben.

Es zeigen:

Fig. 1 eine schematische Darstellung eines Fahrzeugbahns auf einer begrenzten Fläche eines Fabrikbodens,

Fig. 2 eine schematische Darstellung eines Fahrzeugs, das längs einer vorbestimmten Bahn geleitet und gesteuert werden soll,

Fig. 3 und 4 Diagramme der Position und Ausrichtung des Fahrzeugs auf der Fabrikbodenfläche in bezug auf Fabrikkoordinatenachsen,

Fig. 5 und 6 schematisch die Bahn eines Fahrzeugs, die freie Bahnbreite des Fahrzeugs und Abbiegungen in der Bahn,

Fig. 7 ein Blockschaltbild des Systems,

Fig. 8 ein Blockschaltbild eines Kalman-Filterprozesses des Systems,

Fig. 9 ein Diagramm, das Weg- und Richtungsfehler des Fahrzeugs darstellt, und

Fig. 10 ein Diagramm einer Transformation zwischen «Fabrikrahmen»-Koordinaten und «Fahrzeugrahmen»-Koordinaten zur Bestimmung von Positionsfehlern.

Unter «Koppelnavigationseinrichtung» soll hier eine Einrichtung zur Navigation in Abhängigkeit von der Feststellung

einer Relativbewegung zwischen Fahrzeug und Boden verstanden werden.

Fig. 1 stellt eine Fabrikbodenfläche 1 mit darauf montierten, ein Koordinatensystem bildenden Koordinatenachsen X und Y dar. Die Koordinaten eines Punktes (oder Standortes) auf dieser Fläche werden nachstehend als «Fabrikkoordinaten» im Unterschied zu «Fahrzeugkoordinaten» bezeichnet.

Ein Fahrzeug T, bei dem es sich um ein flaches Transportfahrzeug handeln kann, soll unbemannt auf der Fläche 1 zwischen Stationen A, B, C und D längs einer Bahn fahren, die durch die Fabrikkoordinaten dieser Stationen bestimmt ist. Die dargestellte Bahn dient lediglich der Erläuterung und kann wesentlich komplizierter sein.

Nach Fig. 2 hat das Fahrzeug Antriebsräder 3 mit einem Differentialgetriebe, soweit dies erforderlich ist, und ein schwenkbares Rad 5 an dem einen oder beiden Enden, dessen Lenkwinkel steuerbar ist und das einen (nicht dargestellten) Lenkwinkel-Umformer und einen den zurückgelegten Weg messenden (nicht dargestellten) Weg-Umformer zur Rückführung eines Wegistwertsignals aufweist, um es mit einem Wegsollwert zu vergleichen.

Die Antriebsräder 3 sind drehzahl geregelt und werden über ein Getriebe und einen Gleichspannungswandler aus einer Batterie 7 in an sich bekannter Weise gespeist.

Die wesentlichen Merkmale des Fahrzeugs sind, dass es einen Lenkwinkel und die Geschwindigkeit steuernde bzw. regelnde Antriebseinrichtung aufweist. Die mechanische Einrichtung kann optimiert werden, ist jedoch nicht kritisch. So kann das Lenken alternativ auch durch eine Differentialsteuerung der beiden Antriebsräder statt durch Antriebssteuerung eines schwenkbaren Rades bewirkt werden. Der mechanische Aufbau der Fahrzeugeinrichtung braucht daher nicht näher beschrieben zu werden.

Eine Antriebssteuerungs- und -lenkelektronik 9 erhält Weg- und Lenkwinkelsignale vom schwenkbaren Rad 5 und erzeugt Lenkwinkel-Steuersignale und Geschwindigkeitssteuersignale, wie noch näher beschrieben wird.

Die soweit beschriebene Einrichtung ist eine Koppelnavigationseinrichtung, in der der Fahrzeugstandort auf inkrementeller Basis aus der bekannten Grösse eines zurückgelegten Weges und einer eingeschlagenen Richtung bestimmt wird. Bei derartigen Systemen können — obwohl sie in einigen Anwendungsfällen, bei denen die Wege (Wegstrecken) klein sind — kumulative Fehler aufgrund eines Radschlupfes, unebener Oberflächen, einer Abnutzung usw. auftreten. Gemäss einem weiteren Ausführungsbeispiel der Erfindung ist daher eine Überwachungs- und Korrekturereinrichtung vorgesehen, die auf der Feststellung fester Bezugspunkte und des Standorts des Fahrzeugs zu ihnen beruht. Das Fahrzeug ist mit einer Laserquelle 11 versehen, die so gelagert ist, dass sie ständig um eine vertikale Achse rotiert. Der Laserstrahl hat eine geringe Breite und dehnt sich in der Höhe aus, so dass eine dünne vertikale Beleuchtungslinie auf einem in den Strahlengang gelangenden Ziel entsteht. Auf der Fläche 1 sind mehrere Ziele 13 in verschiedenen Positionen fest installiert, so dass das Fahrzeug — soweit als möglich — von jedem Standort auf der Fläche aus ein oder mehrere Ziele «sehen» kann. Natürlich kann es in einer Fabrik vorkommen, dass Einrichtungen und Aufbewahrungsvorrichtungen umherbewegt werden und ein oder mehrere Ziele von bestimmten Standorten aus verdecken. In solchen Fällen kann die Koppelnavigationseinrichtung wenigstens kurzzeitig «sich selbst überlassen» sein.

Die Ziele 13 sind aus Retro-Reflektoren gebildet, die auftreffendes Licht in der Einfallrichtung reflektieren. Sie können aus vertikalen Streifen aus retroreflektivem Material hergestellt sein, die in der Breite oder durch die An- und Abwesenheit kodiert sind, um ihre Kennung darzustellen. Zweckmässigerweise sind sie auf Regalen in oder über Kopfhöhe angeordnet, um zu

verhindern, dass der Laserstrahl durch auf dem Boden befindliche Gegenstände unterbrochen wird. Der abtastende Laserstrahl kann dementsprechend nach oben gerichtet werden und eine so grosse vertikale Winkelausdehnung aufweisen, dass er Ziele in den infrage kommenden Entfernungen erfassen kann.

Die Laserabtasteinrichtung ist Gegenstand der GB-Patentanmeldung 8 313 339 und wird daher hier nicht ausführlicher beschrieben.

Das Fahrzeug ist mit einem Empfänger ausgerüstet, der den von einem Ziel 13 reflektierten Strahl empfängt und ein die Richtung des reflektierten Strahls und damit der Zielrichtung relativ zum Fahrzeugkurs darstellendes Zeichen bildet.

Der zuletzt genannte Parameter ist der Winkel, den die Fahrzeuggängsachse mit der X-Achse des Fabrikkoordinatensystems einschliesst. Der «Kurs» ist nicht notwendigerweise die Fahrtrichtung, da das Lenkrad in dem betreffenden Augenblick nicht geradeaus stehen muss.

Die Fahrzeuganlage enthält ferner eine Mikroprozessor- und Datenspeichereinrichtung 19. Zu den vor Beginn einer Fahrt gespeicherten Daten gehört eine Bahn-«Karte» in Form der Koordinaten der Punkte A, B, C und D. Die Bahn kann Abschnitte aufweisen, bei denen eine verringerte Fahrzeuggeschwindigkeit erforderlich ist, und die Grenzggeschwindigkeit für jeden geraden Abschnitt (Segment oder Vektor) A bis B usw. ist vorgeschrieben und gespeichert.

Zusätzlich zu Grenzwerten bezüglich der Geschwindigkeit längs jedes Bahnvektors kann es sein, dass sich die Toleranzen einer Querabweichung des Fahrzeugs von der Bahnlinie von Vektor zu Vektor ändern. So gibt es praktisch eine «freie» (frei verfügbare) Bahnbreite für jeden Vektor, die durch das Fahrzeug nicht überschritten werden darf, und diese Bahnbreite kann sich in Vektorübergängen ändern. Für jeden Vektor ist die Bahnbreite ebenfalls vor jeder Fahrt gespeichert.

Die obige Information, Bahndaten (Koordinaten von Übergangspunkten), zulässige Geschwindigkeit bei jedem Vektor und Bahnbreite jedes Vektors kann im Fahrzeug-Datenspeicher durch manuelle Eingabe eines Programms gespeichert sein oder von einer Basisstation 15 zu einer Kommunikationsantenne 17 auf dem Fahrzeug T übertragen werden, wobei die Antenne die Daten empfängt und in die Fahrzeugdatenspeicher- und Mikroprozessoreinrichtung 19 überträgt. Die Übertragungs- oder Kommunikationseinheit kann regelmässig die augenblickliche Fahrzeugposition an die Basisstation übermitteln oder für den gleichen Zweck abgefragt werden.

Die hierbei durchgeführten Rechen- und Verarbeitungsoperationen werden nachstehend anhand der folgenden Figuren zusätzlich erläutert. Fig. 3 stellt die Fahrzeugnavigationsskoordinaten dar, wobei die Position durch die «Fabrik»-Koordinaten x und y angegeben wird, der Fahrzeugkurs der Winkel ψ , d.h. der Winkel zwischen der Fahrzeugachse und der X-Achse, die Vorwärtsgeschwindigkeit V und die Drehgeschwindigkeit, d.h. Winkelgeschwindigkeit des Fahrzeugs, U ist.

Fig. 4 stellt ausserdem die Fahrzeug-Ziel-Koordinaten dar. Der Ziel-Reflektor R mit den Fabrik-Koordinaten x_i und y_i wird unter einem Winkel θ_i zum Fahrzeugkurs festgestellt, wobei das Fahrzeug selbst zu einer bestimmten Zeit t die Positionskoordinaten x und y und den Kurs ψ hat.

Fig. 5 zeigt den Übergang (die Verbindungsstelle) zweier Vektoren, wo die freien Bahnbreiten, die durch die gespeicherten Daten bestimmt sind, gleich sind. Für einen «weichen» Betrieb ist es wesentlich, dass die Bahn an Vektorübergängen kontinuierlich und nicht winklig ist. Daher wird eine gekrümmte Bahn oder ein gekrümmtes Segment (Kurve) berechnet, um die Kreuzung entsprechend anzupassen. Hierbei muss die Krümmung so klein wie möglich, d.h. der Krümmungsradius möglichst gross sein, um die in der Kurve (Abbiegung) auf das Fahrzeug einwirkenden Kräfte möglichst klein zu halten und gleichzeitig sicherzustellen, dass die Bahnbreite nirgends kleiner

als die kleinere der beiden Bahnbreiten ist. Nach Fig. 5 ist der Krümmungsradius daher gleich der halben gemeinsamen Bahnbreite. Nach Fig. 6, die Vektorübergänge mit verschiedenen Bahnbreiten darstellt, haben die angepassten Kurven an den Punkten E und F jedoch jeweils einen Radius von $p_{w_a}/2$ und $p_{w_b}/2$.

Fig. 7 veranschaulicht in Form eines Blockschaltbildes die auf dem Fahrzeug durchgeführten Navigationsverarbeitungsoperationen.

Die Koordinatenpunkte auf der Bahn und die Bahnbreiten der verschiedenen Bahnvektoren darstellende Daten werden empfangen und gespeichert (21). Der Prozessor berechnet dann (23) die an den Vektorübergängen erforderlichen weichen Kurven auf der Basis der Bahnbreiten, wie bereits erwähnt wurde. Die in den Fig. 5 und 6 dargestellten Kurven mit konstantem Radius sind in der Praxis nicht erreichbar, da der Übergang von einer geraden Bahn auf eine Kreisbahn eine augenblickliche Änderung der Winkelgeschwindigkeit von null auf einen endlichen Wert und damit eine unendlich hohe Beschleunigung und Kraft bedeuten würde. Bei einer idealen Kurve müsste die Krümmung linear zu- und dann abnehmen.

Eine Annäherung an diese Kurve ergibt sich durch Verwirklichung der folgenden Gleichung:

$$\vec{x}(\alpha) = (1-\alpha)^2 \vec{x}_1 + 2\alpha(1-\alpha) \vec{x}_2 + \alpha^2 \vec{x}_3 \quad (1)$$

Darin sind α der Bruchteil, in den die Abbiegung unterteilt ist, d.h. Zehntel, Fünftel oder ein beliebiger anderer Bruchteil,

$\vec{x}_2$ ein Vektor, der die Koordinaten eines Übergangspunktes darstellt,

$\vec{x}_2$ und $\vec{x}_3$ Vektoren, die die Koordinaten der Punkte am Anfang und Ende der Kurve darstellen, und

$\vec{x}$ der laufende Vektor, der die Koordinaten der Punkte auf der Kurve nach jedem Bruchteil α darstellt.

Durch Einsetzen von Zehntel, zwei Zehntel, drei Zehntel usw. für α erhält man daher die Koordinaten aufeinanderfolgender Punkte auf der Kurve. Dieser Prozess wird in der Einrichtung 23 in Fig. 7 mit einem Wert für α durchgeführt, der in der nachstehend erläuterten Weise bestimmt wird.

Dieses Prinzip einer inkrementellen Zusammensetzung der Kurven gilt auch für die geraden Abschnitte, wobei für die Koordinaten aufeinanderfolgender Punkte auf dem geraden Abschnitt gilt

$$\vec{x}(\alpha) = (1 - \alpha) \vec{x}_0 + \vec{x}_1$$

wobei x_0 und x_1 die Koordinaten von Punkten am Anfang und Ende des geraden Abschnitts sind.

Während die Länge der geraden Abschnitte etwa 20 bis 30 m betragen kann, kann jeder inkrementelle Vektor eine Länge von etwa 5 cm haben. Der Bruchteil α beträgt dann 1/500.

Die Bildung der inkrementellen Vektoren erfolgt in einem Zielpeilungsprädiktor 25 aus den Anfangsdaten (27), die die Geschwindigkeitsgrenzwerte für die verschiedenen Bahnvektoren darstellen.

Jeder inkrementelle Vektor ist durch die Koordinaten des Punktes (des «Bezugspunktes») an seinem vorderen Ende bestimmt. Die Ermittlung des Bezugspunktes erfolgt einmal pro Grundzeitspanne (mit etwa 20 Hz), die durch einen Taktimpuls-generator der Anlage bestimmt wird. Da die (maximale) Geschwindigkeit für jeden Vektor vorbestimmt ist und die Zeitspanne festliegt, ist damit die maximale Länge jedes inkrementellen Vektors bestimmt. Bei einer Geschwindigkeit von 1 m/s beträgt die Länge des inkrementellen Vektors daher 5 cm.

Nachdem die maximale Länge auf diese Weise bestimmt worden ist, kann sie etwas verringert werden, um eine gerade Anzahl inkrementeller Vektoren im Bahnverkehr zu erhalten, von der α den reziproken Wert darstellt.

Wenn die Länge des inkrementellen Vektors kleiner als ihr maximal zulässiger Wert gewählt wird, verringert sich die Geschwindigkeit des Fahrzeugs in diesem Abschnitt der Bahn entsprechend. Auf diese Weise ergibt sich eine dynamische Regelung der Geschwindigkeit.

Bei der Zusammensetzung der Kurve in der erwähnten Weise durch Berechnung aufeinanderfolgender Bezugspunkte wird der inkrementierte Bezugskurs ψ , als der Winkel ermittelt, den die Linie zwischen aufeinanderfolgenden Bezugspunkten mit der Fabrik-X-Achse einschliesst.

Die so berechneten Bezugspunkte, die die gewünschte Bahn im Gegensatz zu der tatsächlich verfolgten Bahn darstellen, werden einmal pro Basiszeitspanne erzeugt und für einen Vergleich mit den durch das Fahrzeug eingenommenen Ist-Positionen gespeichert. Diese Ist-Positionen sind praktisch Schätzwerte, die durch die Koppelnavigationseinrichtung 35, 39 nach Prüfung und Korrektur durch das Laser-Ziel-Bezugssystem, ermittelt werden.

Wenn die erzeugten Bezugspunkte aufgrund von Massenträgheiten usw. vor dem Fahrzeug herlaufen, kann die Positions-differenz zwischen dem letzten Bezugspunkt und dem Fahrzeug als Wegfehler betrachtet werden, den das Fahrzeug zu verringern sucht. Je grösser dieser Wegfehler ist, umso grösser sollte die Geschwindigkeit des Fahrzeugs sein (innerhalb der für den betreffenden Bahnvektor oder die betreffende Biegung vorgegebenen Grenze), um ihn zu verringern. Umgekehrt sollte die Geschwindigkeit verringert werden, wenn die erzeugten Bezugspunkte unmittelbar vor der Fahrzeugposition liegen. Dieser zuletzt genannte Fall tritt auf, wenn sich das Fahrzeug einer Haltestation am Ende eines Bahnvektors nähert. Die Anzahl der Bezugspunkte, die «in Wartestellung liegen», ist daher ein Mass der erforderlichen Geschwindigkeit, und der Fahrzeugantriebsmotor wird entsprechend gesteuert.

Die erzeugten Bezugspunkte und der zugehörige inkrementelle Bezugskurs ψ werden zur Positions- und Kursfehlerbestimmung (29) passiert, und zwar jeweils ein Paar auf einmal.

Der Schätzwert der Fahrzeugposition und des Fahrzeugkurses wird durch eine Kalman-Filter-Einrichtung 37 nach Fig. 7 ermittelt. Dabei werden Zielfeststellungs-Eingangssignale θ_i (Fig. 4) verwendet, die durch die Zielfeststellereinrichtung 33 gebildet wurden. Den durch das Fahrzeug zurückgelegten Weg und den Lenkwinkel darstellende Signale werden durch die bereits erwähnten Umformer 35 nach Fig. 7 gebildet. Die Kalman-Filter-Einrichtung 37 selbst ist ausführlicher in Fig. 8 dargestellt.

Nach Fig. 8 ist der erste durchzuführende Prozess die Abschätzung der Position und des Kurses am Ende einer Basiszeitspanne (Δt) aus den tatsächlichen oder abgeschätzten Vorwärts- und Drehgeschwindigkeiten des Fahrzeugs während dieser Zeitspanne und der Position am Anfang dieser Zeitspanne.

Die durch den Umformer 35 in den Positionsprädiktorprozess eingegebenen Signale stellen den durch das schwenkbare Rad gemessenen Lenkwinkel θ und den durch das schwenkbare Rad (Lenkrad) zurückgelegten, in Form von Wegzählimpulsen dargestellten Weg dar. Das Weginkrement und das Inkrement Δt ergeben die Geschwindigkeit in Richtung des schwenkbaren Rades, aus der die Vorwärtsgeschwindigkeit V des Fahrzeugs in seiner Kursrichtung durch Multiplikation mit dem Cosinus des Lenkwinkels θ ermittelt wird. Die Winkelgeschwindigkeit U des Fahrzeugs wird durch Multiplikation der Lenkradgeschwindigkeit mit dem Sinus des Lenkwinkels θ entsprechend der Geometrie der Fahrzeugräder ermittelt. Die Geschwindigkeiten V und U werden in jeder Zeitspanne unter der Annahme berechnet, dass die Geschwindigkeiten und der Lenkwinkel in dieser (kurzen) Zeitspanne Δt konstant sind.

Die bei dem Prozess des Positionsprädiktors 39 nach Fig. 8 verwirklichten Gleichungen sind nachstehend abgeleitet: So lassen sich anhand von Fig. 3 für die Änderungsgeschwindigkeiten

der Positionskoordinaten x und y und den Kurswinkel ψ die nachstehenden Gleichungen angeben:

$$\begin{aligned}\dot{\psi} &= U \\ \dot{x} &= V \cos \psi \\ \dot{y} &= V \sin \psi\end{aligned}$$

Durch Integration dieser drei Gleichungen über die Zeit Δt ergeben sich die folgenden Gleichungen:

$$\begin{aligned}\psi(t + \Delta t) &= \psi(t) + U \cdot \Delta t \\ x(t + \Delta t) &= x(t) + V(\sin(\psi(t) + U \cdot \Delta t) - \sin(\psi(t))) \Delta t / U \cdot \Delta t \\ y(t + \Delta t) &= y(t) - V(\cos(\psi(t) + U \cdot \Delta t) - \cos(\psi(t))) \Delta t / U \cdot \Delta t\end{aligned}$$

Nach der ersten dieser Gleichungen ist der Wert ψ zur Zeit $(t + \Delta t)$ gleich dem Wert von ψ zur Zeit t plus dem Winkel, um den sich das Fahrzeug in der Zeitspanne Δt gedreht hat. In der zweiten und dritten Gleichung haben t und $(t + \Delta t)$ die gleiche Bedeutung wie in der ersten Gleichung.

Diese Gleichungen können für die Schätzwerte umgeschrieben werden zu:

$$\begin{aligned}\hat{\psi}(t + \Delta t | t) &= \hat{\psi}(t | t) + U \cdot \Delta t \\ \hat{x}(t + \Delta t | t) &= \hat{x}(t | t) + V(\sin(\hat{\psi}(t | t) + U \Delta t) - \sin \hat{\psi}(t | t)) / U \\ \hat{y}(t + \Delta t | t) &= \hat{y}(t | t) - V(\cos(\hat{\psi}(t | t) + U \Delta t) - \cos \hat{\psi}(t | t)) / U\end{aligned}$$

Der Zirkumflex über einem Parameter bezeichnet einen Schätzwert, und das Symbol « $|t$ » bedeutet «ausgewertet zur Zeit t ».

Wie man sieht, genügen diese Gleichungen zur Abschätzung der Position und des Kurses des Fahrzeugs zur Zeit $(t + \Delta t)$, wenn die geschätzte Position und der geschätzte Kurs zur Zeit t bekannt sind. Die Ausgangssignale des Blocks 39 sind daher die geschätzten Koordinaten x und y und der geschätzte Kurs ψ des Fahrzeugs nach einer weiteren Zeitspanne Δt , die bis auf die Eingangsgrösse 41 nur auf dem Koppelnavigationssystem des zurückgelegten Weges und des durchlaufenen Winkels beruhen.

Nach Fig. 4 kann der abgeschätzte Winkel eines Ziel-Reflektors R in Form des Fahrzeugkurses ψ und der Koordinaten des Fahrzeugs und des Ziels nach folgender Gleichung ermittelt werden:

$$\hat{\theta}_i(t + \Delta t | t) = \tan^{-1} \left[\frac{y_i - \hat{y}(t + \Delta t | t)}{x_i - \hat{x}(t + \Delta t | t)} \right] - \psi(t + \Delta t | t)$$

In dieser Gleichung ist $\hat{\theta}_i$ der geschätzte Zielwinkel zur Zeit $(t + \Delta t)$, ausgewertet zur Zeit t . Die Koordinaten x_i und y_i des Ziels sind durch die Anordnung der Ziele auf dem Fabrik-Boden vorbestimmt. Die geschätzten Werte x und y des Fahrzeugs und der geschätzte Wert ψ des Kurses werden in dem Prozess 39 ermittelt. Die Gleichung wird somit in einem Zielpelungsprädiktor 43 verarbeitet, der die Ausgangsgrösse $\hat{\theta}_i$ bildet.

Das Ausgangssignal der Zielfehlerfeststellereinrichtung 33 ist eine genaue Darstellung des Zielwinkels θ_i , die mit dem Schätzwert $\hat{\theta}_i$ in einem Prozess 45 verglichen wird, um einen Zielschätzfehler $\theta_i - \hat{\theta}_i$ zu ermitteln.

Dieses Fehlersignal wird durch einen Kalman-Verstärker 47 verarbeitet, der den Fehler jeweils mit Kalman-Verstärkungsfaktoren k_r , k_x und k_y multipliziert. Die Korrekturprodukte werden dann in einem Prozess 49 zu den Vorhersagen des Koppelnavigations-Positions-Prädiktors 39 nach den folgenden Gleichungen addiert, um korrigierte Schätzwerte von Fahrzeugkurs und -position zu erhalten:

$$\begin{aligned}\hat{\psi}(t + \Delta t | t + \Delta t) &= \hat{\psi}(t + \Delta t | t) + k_r(\theta_i - \hat{\theta}_i) \\ \hat{x}(t + \Delta t | t + \Delta t) &= \hat{x}(t + \Delta t | t) + k_x(\theta_i - \hat{\theta}_i) \\ \hat{y}(t + \Delta t | t + \Delta t) &= \hat{y}(t + \Delta t | t) + k_y(\theta_i - \hat{\theta}_i)\end{aligned}$$

Die Ableitung der Kalman-Korrekturprodukte und die Wirkungsweise der Kalman-Filter ist in dem Buch «Optimisation of Stochastic Systems» von M. Aoki, herausgegeben von Academic Press 1967, angegeben.

Auf diese Weise werden korrigierte Schätzwerte des Kurses und der Position zur Zeit $(t + \Delta t)$, ausgewertet zu dieser Zeit, aus den Schätzwerten des Kurses und der Position ermittelt, die zur Zeit t ermittelt und durch den Kalman-Filterprozess korrigiert wurden. Diese besten Schätzwerte werden in den Fehlerbestimmungsprozess in der Kalman-Filtereinrichtung 37 nach Fig. 7 und auch als «augenblickliche» Eingangsgrößen 41 in den Positionsprädiktor 39 nach Fig. 8 eingegeben, um aus diesen den nächsten Bezugspunkt vorauszusagen. Wenn daher ein oder mehrere Zielbezugskorrekturen ausfallen, beispielsweise weil die Ziele verdeckt sind, dann wird der nächste Bezugspunkt durch Koppelnavigation aus dem letzten Bezugspunkt vorausberechnet, bei dem eine Zielfeststellungskorrektur durchgeführt wurde.

Anhand von Fig. 7 wird nachstehend die Ermittlung von Weg- und Kursfehlern beschrieben. Die beiden Eingangsgrößen des Prozesses im Prädiktor 39 sind a) die erzeugte Folge von Bezugspunkten, die die ideale Bahn definieren, und b) der beste Schätzwert des Kurses und der Position des Fahrzeugs, der durch den Kalman-Prozess nach Fig. 8 ermittelt wurde.

Fig. 9 zeigt aufeinanderfolgende inkrementelle Vektoren IV1 und IV2 und ihre zugehörigen Bezugspunkte RP1 und RP2, die nach dem Prozess in der Bezugspunkterzeugungseinrichtung 25 (Fig. 7) ermittelt wurden. Fehler bei der Navigation des Fahrzeugs T werden in Form des senkrechten Abstands d_e des Fahrzeugmittelpunkts vom örtlichen inkrementellen Vektor und als Winkelfehler θ_e zwischen dem Fahrzeugkurs und der Richtung des örtlichen inkrementellen Vektors dargestellt.

Die Messung dieser Fehler d_e und θ_e erfolgt durch eine Transformation des Istwerts der Fahrzeugposition in Fabrik-Koordinaten in eine Position in einem Fahrzeug-Bezugsrahmen, in dem der Nullpunkt mit dem Bezugspunkt des örtlichen inkrementellen Vektors und die neue X-Achse mit dem örtlichen inkrementellen Vektor zusammenfällt. Diese Transformation ist in Fig. 10 dargestellt, in der X und Y die Fabrik-Koordinatenachsen, X^* und Y^* die Fahrzeug-Rahmenachsen, x_r und y_r die Koordinaten des örtlichen inkrementalen Vektorbezugspunktes im Fabrik-Rahmen, x und y die Koordinaten des Fahrzeugs im Fabrik-Rahmen und x^* und y^* die Fahrzeug-Koordinaten im Fahrzeug-Rahmen sind.

Der Winkel ψ_r ist der Kurs bzw. die Richtung des inkrementellen Vektors relativ zum Fabrik-Rahmen. Die nachstehenden Transformationsgleichungen lassen sich anhand von Fig. 9 durch einfache geometrische Betrachtungen ableiten:

$$\begin{aligned}x^* &= (x - x_r) \cos \psi_r + (y - y_r) \sin \psi_r \\y^* &= (y - y_r) \cos \psi_r - (x - x_r) \sin \psi_r\end{aligned}$$

In diesem Fahrzeugbezugsrahmen ist der Abstands- oder Wegfehler d_e die y^* -Koordinate des Fahrzeugmittelpunkts und der Winkelfehler θ_e der direkte Transformationswinkel ψ_r .

Wenn das Fahrzeug den örtlichen Bezugspunkt x_r , y_r passiert, ändert sich das Vorzeichen von x^* von minus nach plus. Diese Änderung löst eine Löschung des augenblicklichen Fahrzeugbezugsrahmens und seine erneute Ausbildung in der Weise

aus, dass sein Nullpunkt mit dem folgenden Bezugspunkt und die x^* -Achse mit dem nächsten inkrementellen Vektor zusammenfällt. Man sieht daher, dass der Fahrzeugrahmen synchron mit dem Fahrzeug fortschreitet.

Die Fehlerwerte d_e und θ_e werden daher zur Ableitung eines Lenkwinkel-Sollwertsignals θ_d als direkte Funktion dieser Fehlerwerte (direkt proportional zu diesen Fehlerwerten) verwendet. Der Sollwert der Winkelgeschwindigkeit U_d wird zuerst ermittelt als:

$$U_d = K_1 d_e + K_2 \theta_e$$

in der K_1 und K_2 Verstärkungsfunktionen (Verstärkungsfaktoren) sind, die durch die Dynamik des Fahrzeugs selbst bestimmt sind. Der Sollwert des Lenkwinkels wird dann aus der Fahrzeuggeometrie und dem Sollwert der Vorwärtsgeschwindigkeit des Fahrzeugs berechnet.

Wie bereits erwähnt wurde, wird die Fahrzeuggeschwindigkeit durch Messung der Anzahl der inkrementellen Vektoren zwischen dem Fahrzeug und dem zuletzt erzeugten gesteuert. Der zuletzt erzeugte liegt stets vor dem Fahrzeug und scheint das Fahrzeug «weiterzuziehen», wie wenn ein elastisches Band das Fahrzeug mit der zuletzt ermittelten Bezugsposition verbindet.

Aus einer stationären Position werden die Bezugspunkte mit einer linearen Geschwindigkeit von der «Ruhe»-Station weg gebildet, so dass sie das erwähnte «elastische Band» praktisch strecken. Das Fahrzeug T wird entsprechend dem Fehl Abstand vom letzten Bezugspunkt und in Abhängigkeit von seiner Massenträgheit und Leistung beschleunigt, so dass der Fehler allmählich verringert wird, und zwar bis ein stationärer Zustand erreicht ist, in dem die Fahrzeuggeschwindigkeit gleich der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Bezugspunkte ist.

Die Bezugspunktgeschwindigkeit und damit die Fahrzeuggeschwindigkeit können während einer Fahrt während einer vorbestimmten Bahn dynamisch geändert werden, und zwar durch Änderung der Inkrementlänge [d.h. durch Änderung von α in Gleichung (1)] zwischen aufeinanderfolgenden Bezugspunkten.

Wenn die Erzeugung von Inkrementvektoren und Bezugspunkten abgeschlossen ist, endet der letzte inkrementelle Vektor an der letzten Halteposition, die durch die ursprüngliche Bahn vorgeschrieben ist, die ihrerseits in Koordinatenpositionsbestimmungsbahnvektoren vorgegeben ist. Die Fahrzeuggeschwindigkeit verringert sich mit abnehmendem Abstands- bzw. Wegfehler. Durch Beeinflussung des Verhältnisses von Abstandsfehler zu Geschwindigkeitssollwert wird die Geschwindigkeit so geregelt, dass der Endpunkt ohne Überschwingung erreicht wird. Auch hier ist der Fahrzeugrahmen wieder unmittelbar anwendbar, da die x^* -Koordinate der in dem Rahmen zurückzulegende Weg ist, und dies kann ohne weitere Rechnung überwacht werden.

Die elektromagnetische Peilungseinrichtung 33 ist bei obigem Ausführungsbeispiel ein Laser-System, durch das eine Richtungsmessung mittels eines azimuthal abtastenden dünnen Laserstrahls bewirkt wird. Stattdessen können aber auch Radarstrahlen verwendet werden, die eine genaue Peilung durch Phasenvergleichsverfahren ermöglichen. Ferner können die Reflektoren durch Transponder (Antwortgeräte) mit codierten Ausstrahlungen ersetzt werden.

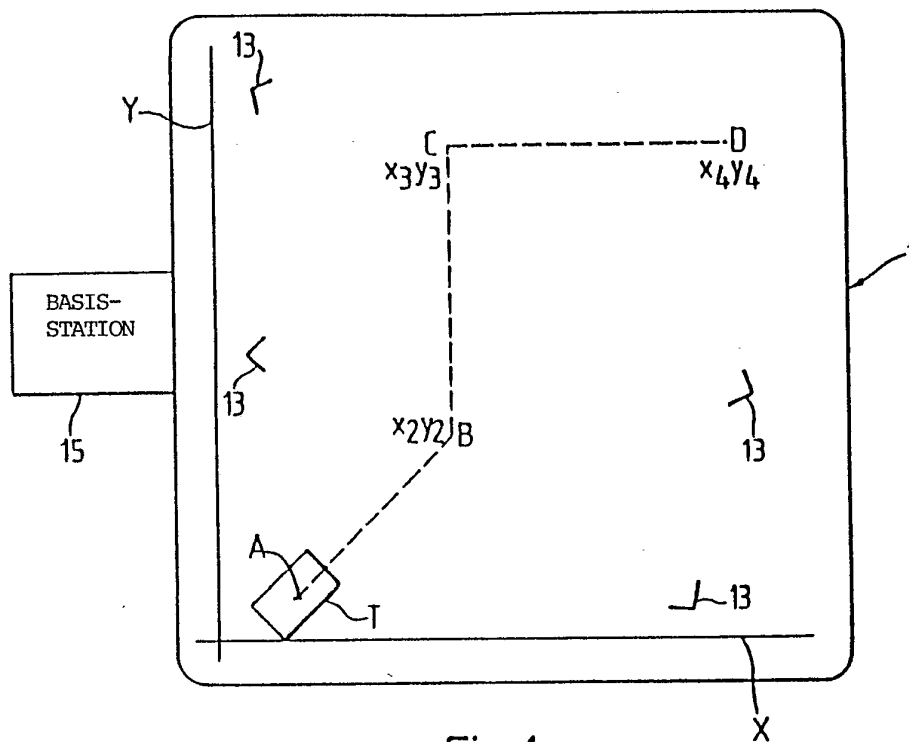


Fig. 1

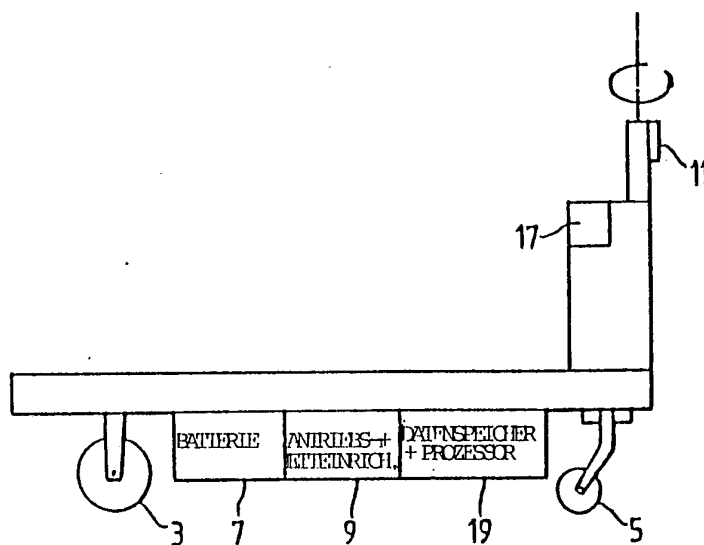


Fig. 2

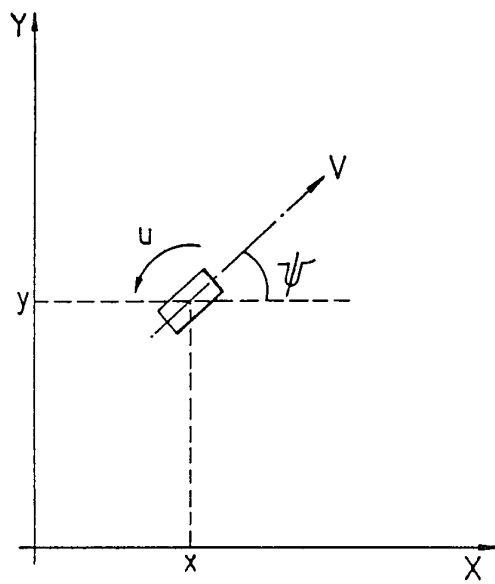


Fig. 3

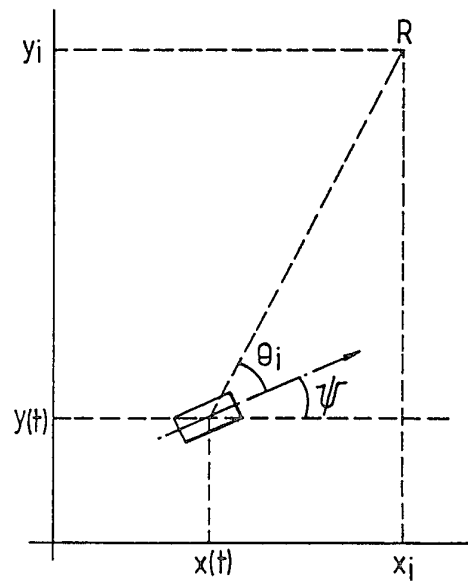


Fig. 4

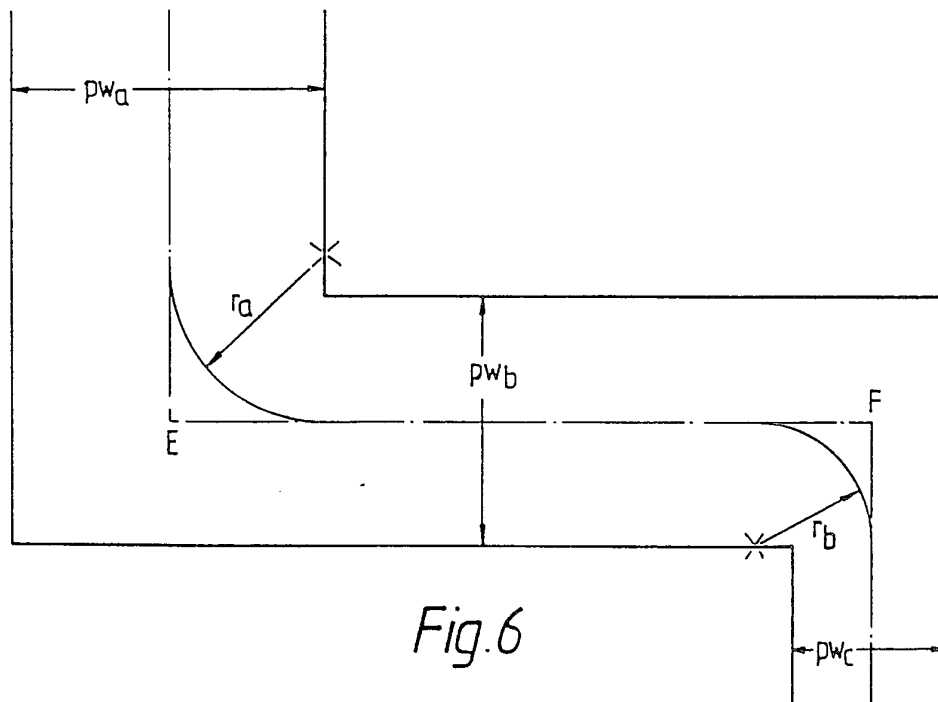


Fig. 6

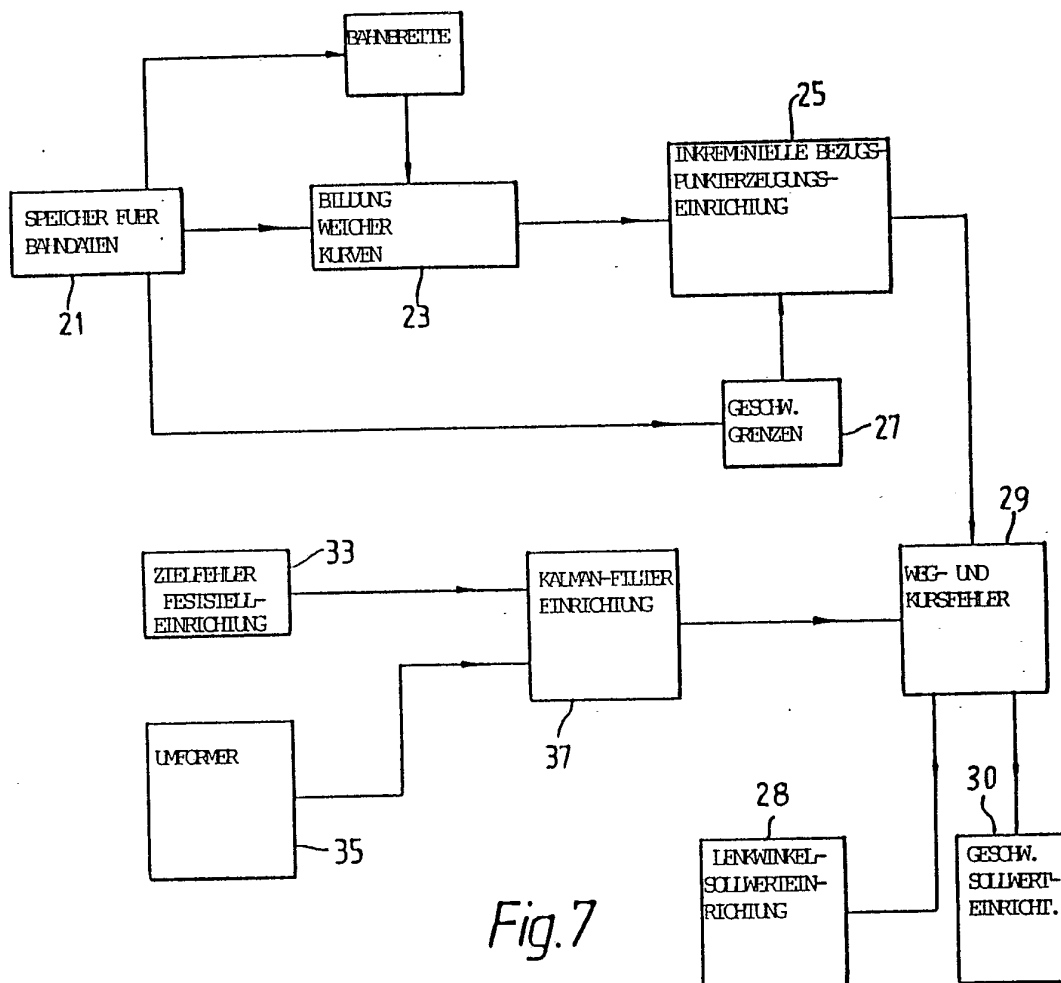


Fig. 7

Fig. 5

