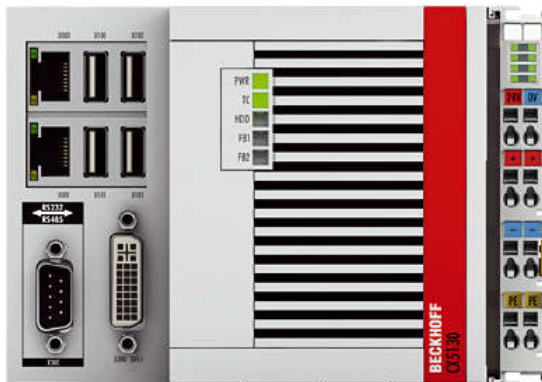


Der Navigationsrechner des Fraunhofer IML

Ein Steuerungsmodul zur leitspurlosen Führung
Fahrerloser Transportfahrzeuge
(z. B. mittels Laser-Navigation)



Verfasser: Th. Albrecht
Stand: August 2019

1 Allgemeines

Zur leitspurlosen Führung Fahrerloser Transportfahrzeuge (FTF) sind drei Funktionen erforderlich, die bei der konventionellen Spurführung (d. h. mittels optischer/magnetischer/induktiver Leitspur) in dieser Form nicht verwendet werden:

1. Orientierung, d. h. die Bestimmung der aktuellen Fahrzeugpose (d. h. X, Y und Gierwinkel = Drehlage des Fahrzeugs in einem Welt-Koordinatensystem)
2. Bahnbeschreibung, d. h. die Definition einer virtuellen Spur (Bahn, Fahrweg) und die Berechnung der akt. Sollwerte für Position und Geschwindigkeit
3. Bahnregelung, d. h. die Ansteuerung der Lenk- und Fahrtriebe in einer Weise, dass das Fahrzeug der geplanten/gewünschten Bahn folgt

Diese drei Funktionen werden in einem Steuerungsmodul, dem sog. **Navigationsrechner**, implementiert und werden in gleicher Weise bei allen Fahrzeugen mit virtueller Spurführung benötigt – unabhängig von der eingesetzten Methode zur Positionsbestimmung (Differential-GPS, Lasertriangulation, Umgebungsnavigation, Navigation mittels Bodenmerkmalen, Magneten/Transpondern etc.).

Im Allgemeinen sind die drei Funktionen voneinander unabhängig, d. h. die Bahnbeschreibung ist z. B. unabhängig von der Art, wie die aktuelle Fahrzeugposition bestimmt wird. Der Navigationsrechner unterstützt zahlreiche Ortungs- und Spurführungsverfahren und kann daher mit diversen Sensoren für unterschiedliche Ortungsverfahren verbunden werden.

Der Navigationsrechner verfügt über Schnittstellen zu Sensoren, Aktoren und der übergeordneten FTF-Steuerung (üblicherweise eine SPS, programmiert durch den FTF-Hersteller). Es wird eine Anzahl gebräuchlicher Schnittstellen zur Verfügung gestellt, sodass der Navigationsrechner in die meisten FTF-Steuerungssysteme mit minimalen Änderungen integriert werden kann.

Die Fahrzeugsteuerung muss üblicherweise folgende Funktionen und Aufgaben ausführen (als Basisfunktionalität, unabhängig von der jeweiligen Ausführung und Art des Fahrzeugs):

- Kommunikation mit einer stationären Leitsteuerung (für Verkehrsregelung und Transportauftragsverwaltung)
- Kommunikation mit einem Bediener (HMI: Text- oder Grafikdisplay, Touch-Display etc.)
- Auswertung der Daten einer Handbedienung (kabelgebunden oder drahtlos)
- Ansteuerung des Lastaufnahmemittels (LAM) mit allen Sensoren und Antrieben
- Sicherheitsfunktionen (Nothalt, Bumper-Stop, Feldumschaltung des/der Sicherheitslaserscanner(s) etc.), ggf. durch zusätzliche Sicherheitssteuerung realisiert
- Transportauftragsverwaltung, Verwaltung des Fahrzeug-Status etc.

Außerdem muss die Kommunikation mit dem Navigationsrechner abgewickelt werden – dies wird i.d.R. eine Feldbusschnittstelle sein (ProfiBus, ProfiNet, CAN-Bus, EtherCAT). Da der CAN-Bus nur eine vergleichsweise geringe Datenübertragungsgeschwindigkeit bietet (max. 500 Kb/s), wird dieser Feldbus nicht empfohlen.

Um Bauraum und Kosten zu sparen, empfehlen wir das folgende Setup: Bei Verwendung des sehr leistungsfähigen Embedded PC CX5130 mit Dual Core CPU und TwinCAT3 des Herstellers Beckhoff ist es möglich, sowohl die Navigationsrechner-Software als auch die Fahrzeugrechner-Software auf einer (derselben) Hardware laufen zu lassen. In diesem Fall erfolgt die Kommunikation der beiden Programme nicht über eine Feldbus-Schnittstelle, sondern als "interne" Kommunikation (via Shared Memory) innerhalb des Embedded PC.

2 Fahrzeug-Kinematik

Durch Änderung von Software-Parametern kann die Navigationsrechner-Software an die gebräuchlichen Fahrzeugtypen/Fahrwerkskinematiken angepasst werden. Dies hat dann Auswirkungen sowohl auf die Odometrie-Algorithmen als auch auf die Bahnplanung und -regelung. Derzeit werden folgende Kinematik-Prinzipien unterstützt:

- **3-Rad** mit 1 angetriebenem und gelenktem Rad + 2 starre Räder; Fahr-/Lenkeinheit mittig oder außermittig montiert
- **3-Rad** mit 2 angetriebenen und gelenkten Rädern, eine Fahr-/Lenkeinheit vorn und eine hinten, jeweils mittig, d. h. in der Fahrzeug-Längsachse angeordnet + 2 starre Räder links und rechts von der Fahrzeugmitte (Lenkwinkel vorn/hinten immer entgegengesetzt)
- **3-Rad** mit 2 angetriebenen und gelenkten Rädern, beide Fahr-/Lenkeinheiten vorn (links/ rechts) montiert + 2 starre Räder hinten
- **3-Rad** mit Lenkung durch Geschwindigkeitsdifferenz („Panzer“): 2 angetriebene starre Räder, fest am Fahrzeugrahmen montiert + 1 oder 2 frei schwenkende Lenkrolle(n)
- **3-Rad** mit Lenkung durch Geschwindigkeitsdifferenz, 2 angetriebene Räder fest in einem drehbaren Lenkschemel montiert + 2 starre Räder hinten
- **4-Rad** mit 2 angetriebenen und gelenkten Rädern + 2 frei drehende Lenkrollen
- **4-Rad** mit 2 angetriebenen und gelenkten Rädern + 2 weitere gelenkte, aber nicht angetriebene Räder
- **4-Rad** mit 4 angetriebenen und gelenkten Rädern

3 Schnittstellen

3.1 Schnittstellen zur Odometriesensorik

Zur Positionsbestimmung wird in allen Fällen die sog. Odometrie (Koppelnavigation) verwendet. Sie liefert relativ zu einer bekannten Ausgangsposition die aktuelle Fahrzeugpose, ist allerdings wg. systembedingter Messfehler insbesondere mit zunehmender Fahrstrecke nicht sehr genau. Der Odometriealgorithmus benötigt sowohl Daten zur zurückgelegten Wegstrecke – erfasst an mindestens einem Rad – als auch die Lenkwinkel (sofern mittels geometrischem Lenkeinschlag gelenkt wird).

Zur Wegstreckenmessung werden vom Navigationsrechner ausschließlich Inkrementalgebersignale ausgewertet. Zur Erkennung der Drehrichtung verfügen diese über zwei um 90° versetzte Spuren. Die Geber liefern entweder 5V Gegentaktsignale nach dem RS422 Standard oder 24V Signale. Die Signalfrequenz darf 500 kHz nicht überschreiten, die Wegauflösung muss mindestens 2 Striche / mm betragen. Die Signale müssen nicht zwingend durch einen Inkrementalgeber erzeugt werden, moderne Motorsteuerungen erzeugen ggf. vergleichbare Ausgangssignale („Inkrementalgeber-Emulation“).

Zur Lenkwinkelmessung können folgende Sensoren verwendet werden:

1. analoge Geber (Potentiometer) mit Ausgangsspannungen von 0V..+10V oder -10V..+10V
2. Absolutwinkelgeber mit parallelen, binären 24V Ausgängen, Gray-Code
3. Inkrementalgeber mit internem oder externem Referenzsignal, 24V oder RS422 (in diesem Fall ist nach dem Einschalten / Hochlaufen der Software ein Referenzieren = Drehen des Lenkantriebs = Drehen des Rads, ggf. im Aufstandspunkt, erforderlich)

Die Sensorik muss eine Lenkwinkelmessung mit einer Genauigkeit von 1/10° ermöglichen.

3.2 Schnittstellen zum absoluten Ortungssystem

Die durch Odometrie ermittelte Relativposition des Fahrzeugs kann durch die mittels Laser-Triangulation – oder ein anderes absolut arbeitendes Ortungsverfahren – gelieferte Absolutposition korrigiert werden. Abhängig vom verwendeten Sensor/Ortungssystem findet die eigentliche Messdatenauswertung und Positionsberechnung im Navigationsrechner oder im Ortungssystem statt. Dementsprechend unterscheiden sich auch die Schnittstellen einschließlich der eingesetzten Datenübertragungsprotokolle.

Für die Lasertriangulation sind die Laserscanner HG43600-Z des Herstellers Götting und R2000 des Herstellers Pepperl+Fuchs einsetzbar, außerdem für die Ortsbestimmung mittels Bodenmerkmalen die Sensoren „Jupiter“ und „Triton“ der Fa. Accerion sowie – für Outdoor-Fahrzeuge – ein Differential-GPS-Empfänger der Fa. Götting.

3.3 Schnittstellen zu Spurführungssensorik

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass der Navigationsrechner auch eingesetzt werden kann um Fahrzeuge zu steuern, die mit Sensorik zur physischen Spurführung (optische/magnetische/induktive Leitspur) ausgestattet sind. Die zum Einlesen der Sensordaten erforderlichen Schnittstellen (analoge Eingangsbaugruppen, Spannungsbereich üblicherweise -10V .. +10V, oder Feldbusschnittstelle) sind ebenso wie die Softwaremodule zur Datenauswertung vorhanden.

Interessant ist diese Funktionalität insbesondere für die sog. „**Hybridnavigation**“ in Verbindung mit der virtuellen Spurführung: ein FTF wird z. B. in langen schmalen Regalgassen mittels Leitdraht geführt, außerhalb der Gassen, beispielsweise beim Gassenwechsel oder bei der Fahrt zu manuellen Arbeits-/Kommissionierplätzen, fährt es frei, also z. B. mit Lasernavigation. Diese Hybridnavigation als Kombination der weiter oben genannten Ortungs- und Spurführungsverfahren, bietet die Navigationsrechner-Software ebenfalls.

3.4 Schnittstellen zur Aktorik

Die Softwaremodule *Bahnplanung* und *Bahnregelung* des Navigationsrechners erzeugen Geschwindigkeits-Sollwerte für den/die Fahrtrieb(e) und den/die Lenkantrieb(e) (sofern vorhanden) des Fahrzeugs. Um ein gutes Regelverhalten zu erzielen ist es (normalerweise) erforderlich, dass der Navigationsrechner die Drehzahlregler für Antrieb und Lenkung direkt ansteuert. Diese Ansteuerung der Regler erfolgt dann entweder über analoge Signale oder über eine schnelle Feldbusschnittstelle. Bei analoger Geschwindigkeitsvorgabe entsprechen dem Spannungsbereich -10V ... +10V der Ausgangsspannung -100% ... +100% der maximalen Fahr- bzw. der maximalen Lenkwinkelgeschwindigkeit.

Sofern die vorhandene Fahrzeug-Steuerung hierzu in der Lage ist, besteht jedoch auch die Möglichkeit, die Sollwerte für Antriebs- und Lenkwinkelgeschwindigkeit vom Navigationsrechner über die Schnittstelle zur FTF-Steuerung zu übertragen und die Leistungsendstufen der Fahr- und Lenkantriebe dort anzuschließen (s. a. Blockschaltbilder in Kap. 6).

4 Bahnbeschreibung

Die nicht vorhandene physische Leitlinie (Leitdraht im Boden, Farbspur oder Metallband auf dem Boden o. ä.), die den Fahrweg des Fahrzeugs festlegt, macht eine andere Art der Bahnbeschreibung erforderlich. Diese sogenannte „virtuelle Leitlinie“ ist als mathematische, softwaremäßige Beschreibung der vom Benutzer gewünschten Bahn zu verstehen und führt zu einem Fahrzeugverhalten äquivalent zu dem der realen Leitlinienführung.

Eine Bahn besteht aus mindestens zwei Entscheidungspunkten (EPs), einem Start- und einem Endpunkt. Zwischen diesen beiden EPs können beliebig viele weitere EPs liegen, z.B.

vor Verzweigungen oder Einmündungen. In Anlagen mit mehr als einem Fahrzeug werden normalerweise die insgesamt vorhandenen Fahrwege in einzelne Blockstrecken aufgeteilt, um Kollisionen und/ oder Deadlocks an Kreuzungen oder Einmündungen zu vermeiden.

Passend zum Navigationsrechner des Fraunhofer IML gibt es ein Grafik-Tool, einen sogenannten „Kursdaten-Editor“ (*CadCourse* für Windows 7/8/10), das eine sehr einfache und komfortable Möglichkeit zur Beschreibung und Konfigurierung von EPs, Verbindungen, Blockstrecken etc. ermöglicht. Die Bahnkurven zwischen den EPs werden nach einigen wenigen Benutzereingaben (Position, Fahrtrichtung, Fahrgeschwindigkeit) automatisch und für das Fahrzeug optimiert durch die Software erzeugt.

Ein kompletter Fahrauftrag, z. B. „fahre (vom aktuellen Standpunkt) zu Zielpunkt EP 81“, besteht dann aus einer Liste von Teilaufträgen, die sequentiell vom Navigationsrechner ausgeführt werden. Ein spezieller Teilauftrag, eine sog. Kontrollfunktion, die an beliebiger Stelle in den Fahrkurs eingefügt werden kann, ermöglicht die Steuerung von bis zu 48 „digitalen“, vom Anwender frei definierbaren Fahrzeugfunktionen. So kann in Abhängigkeit von der Fahrzeugposition z. B. eine Hupe ein- und ausgeschaltet werden, ein Aufzug gerufen, eine Tür geöffnet oder die Fahrzeugsteuerung aufgefordert werden, das Lastaufnahmemittel zu betätigen.

Die umgekehrte Richtung, d. h. von der Fahrzeugsteuerung zum Navigationsrechner ist ebenfalls möglich: an beliebiger Stelle im Fahrkurs können die Zustände von bis zu 48 verschiedenen digitalen Eingangsbits abgefragt werden und dadurch z. B. die Ausführung eines Fahrbefehls abhängig von der mit einem Bit verknüpften Information „Aufzug ist da“ / „Tür ist offen“ bzw. „Aufzug ist nicht da“ / „Tür ist geschlossen“ gestartet bzw. vorübergehend gestoppt/unterbrochen werden.

5 Betriebsarten

5.1 Handbetrieb

In dieser Betriebsart werden Fahrgeschwindigkeit und -richtung durch den Bediener mit Hilfe einer Handsteuerung vorgegeben. Wenn die Fahrzeugkinematik es zulässt (nur möglich bei mindestens zwei Lenkantrieben), kann der Benutzer zwischen Kurvenfahrt und Schräg-/Querfahrt sowie ggf. „Drehen auf der Stelle“ (Rotation um die Fahrzeug-Hochachse bei kleinstmöglichem Flächenbedarf) wählen.

5.2 Semi-Automatik

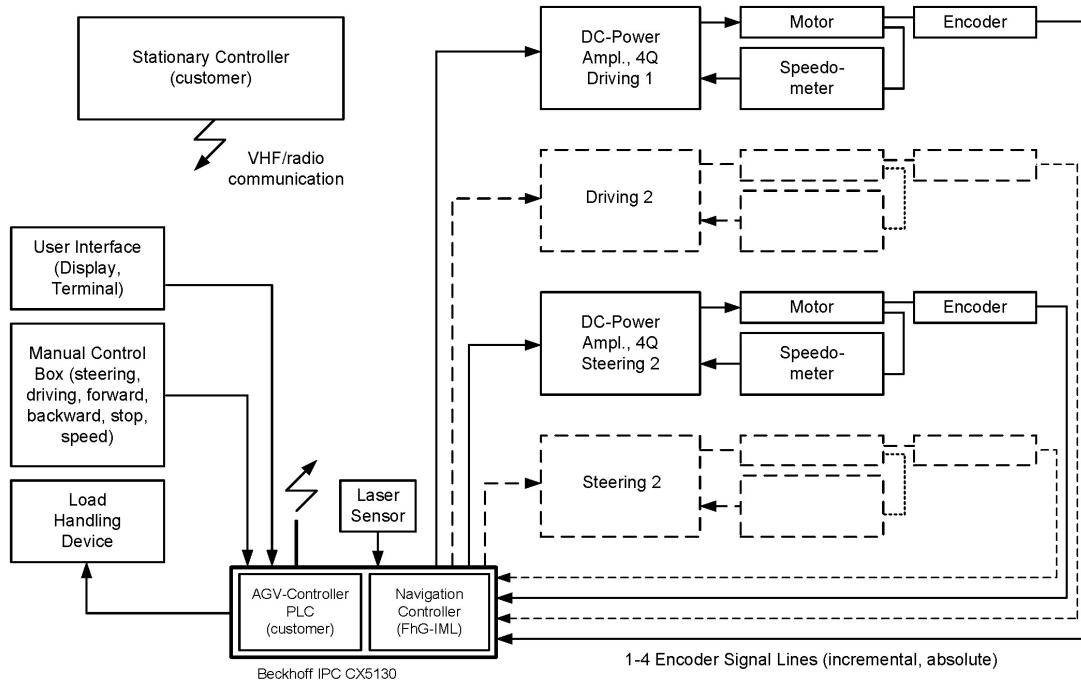
In dieser Betriebsart ist das Verhalten sehr ähnlich wie im Handbetrieb. Falls das Fahrzeug vom Bediener allerdings in die Nähe einer physischen oder virtuellen Leitspur bewegt wird, übernimmt die Navigationsrechner-Software die Lenkung und lenkt das Fahrzeug „automatisch“, d. h. ohne Benutzervorgaben, auf die Leitspur. Dadurch kann das Fahrzeug dann sehr einfach mit der Handsteuerung entlang der Leitspur verfahren werden und zu einem „Aufsetzpunkt“, d. h. einem Startpunkt für den Automatikbetrieb, gebracht werden.

5.3 Automatik

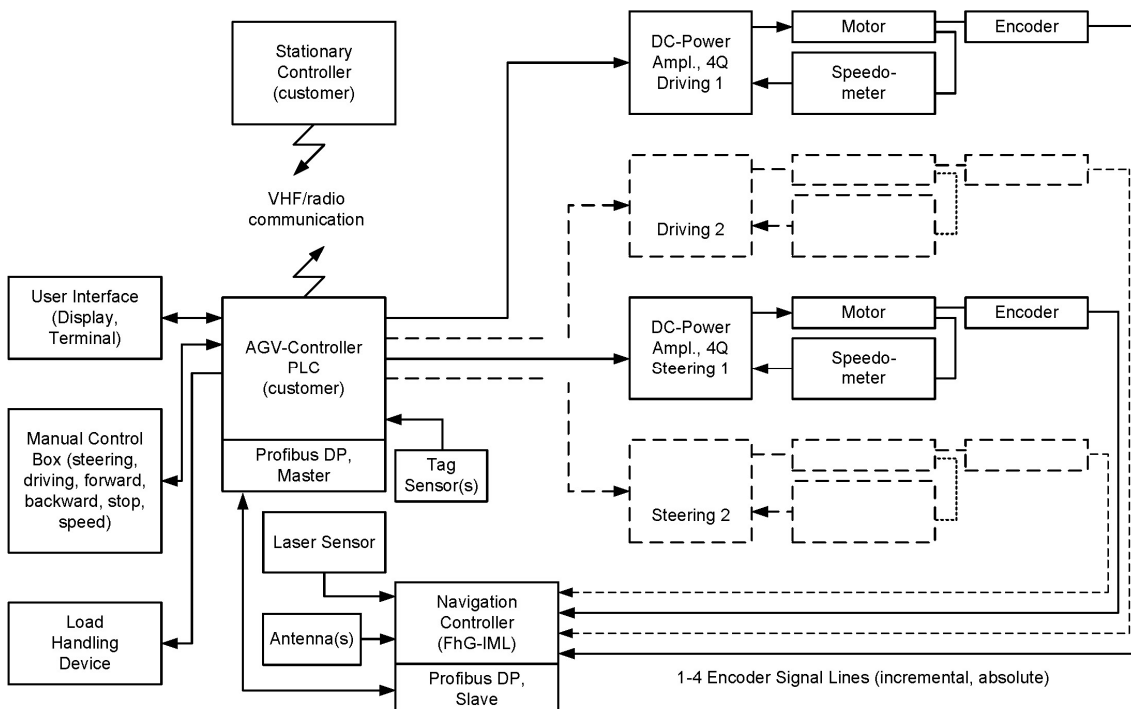
Im Automatikbetrieb werden die Signale der Handsteuerung nicht ausgewertet und die Fahr- und Lenkantriebe werden vom Navigationsrechner angesteuert. Die auszuführenden Fahraufträge werden über die Kommunikationsschnittstelle vom Fahrzeugrechner vorgegeben.

6 Block-Diagramme

Beispiel 1: Navigationsrechner mit Embedded PC CX5130 + Lasertriangulation



Beispiel 2: Navigationsrechner mit 2 Controllern + ProfiBus-Komm. + Hybridnavigation



Aufgaben / Funktionsblöcke einer FTF-Steuerung:

- **Kommunikations-Schnittstellen zu**
 - **Host (i.d.R. Schmal- oder Breitbandfunk)**
 - **Bediener (Touch-Panel o.ä.)**
- **Handbedienung**
- **Lastaufnahmemittelsteuerung**
- **Ablaufsteuerung**

**applikations-, kunden-
und hersteller-
spezifischer Teil**
→ **Fahrzeugsteuerung
als SPS**

- **Positionsbestimmung mittels Odometrie
und ggf. weiterer Sensorik für Leitdraht,
Lasertriangulation, dGPS ...**
- **Bahnplanung und Bahnregelung**
- **ggf. Antriebsregelung**
- **ggf. Fahrauftragsverwaltung**

**applikations-, kunden-
und hersteller-
neutraler Teil**
→ **Navigationsrechner
als „Black Box“**