

Virtuelle Entwicklung und Absicherung von Funktionen der Eigenlokalisierung im Kontext des Autonomous Valet Parking

Dipl.-Ing. **S. Bewersdorff**, Assystem Germany GmbH, Berlin;
Dr.-Ing. **J. Kath**, TESIS GmbH, München;

Kurzfassung

In diesem Beitrag wird eine virtuelle Umgebung zur Entwicklung und Absicherung eines vollautomatisierten Einparkdienstes vorgestellt. Die Eigenlokalisierung des Fahrzeugs stellt sich als besonders wichtig für diesen Anwendungsfall heraus. Es zeigt sich, dass die virtuelle Entwicklung eine effektive Alternative zu realen Versuchsfahrten bietet.

1. Einführung

Autonomous Valet Parking (AVP), die vollautomatisierte Variante eines Einparkdienstes, ist einer der vielen Anwendungsfälle des automatisierten Fahrens. Aufgrund des niedrigen Geschwindigkeitsbereichs wird er in seiner Komplexität oft unterschätzt, bringt jedoch mit engen, überdachten Räumen, komplexer Verkehrsführung, Verkehrsteilnehmern und zahlreichen statischen Hindernissen besondere Herausforderungen mit sich.

Das Fehlen von Standards und etablierten Verfahren lässt viele Fragen offen: Wie kann sich das Fahrzeug ohne GPS selbst lokalisieren? In welchem Format und mit welchen Informationen liegt die Kartierung eines Parkhauses vor? Welche Sensorik wird mindestens benötigt und wie präzise müssen vorgegebene Trajektorien gefahren werden? Welche Parkhäuser sind für AVP geeignet? Und nicht zuletzt: Welchen Anteil übernimmt das Fahrzeug und was muss bzw. kann die Infrastruktur leisten?

Zur Beantwortung dieser Fragen entwickelt Assystem Germany eine prototypische AVP-Funktion, welche weitestgehend mit der Sensorik moderner Serienfahrzeuge auskommen und möglichst unabhängig von der Parkhausinfrastruktur sein soll. Als Versuchsfahrzeug kommt ein e-Golf der Baureihe VII zum Einsatz. Eine ausschließliche Entwicklung mit dem Realfahrzeug verbietet sich aus mehreren Gründen. Zum einen können schon kleine Fehler in der Software Risiken für Dritte und das Versuchsfahrzeug bergen, was einen Versuch in öffentlich zugänglichen Parkhäusern praktisch ausschließt. Zum anderen ist ein Entwicklungszyklus mit Implementierung, Integration, Test und Fehlersuche im realen Fahrzeug auch mit Prototypenplattform vergleichsweise zeitaufwändig. Zusammen mit

TESIS hat Assystem Germany deshalb eine virtuelle Entwicklungs- und Testumgebung für die AVP-Funktion auf Basis des Simulationsframeworks DYNA4 aufgebaut. Mit diesem wird die AVP-Funktion von einzelnen Komponenten bis hin zum integrierten System geprüft und für Realversuche vorbereitet.

2. Autonomous Valet Parking-Funktion

Architektur

Bild 1 zeigt die vereinfachte funktionale Architektur der AVP-Funktion mit ihren wichtigsten Komponenten und Schnittstellen. Es wird davon ausgegangen, dass die Vorgabe des Zielpunktes (Parkplatz) und der Route zwischen Abgabezone, Parkplatz und zurück zur Annahmezone durch die Infrastruktur vorgegeben wird.

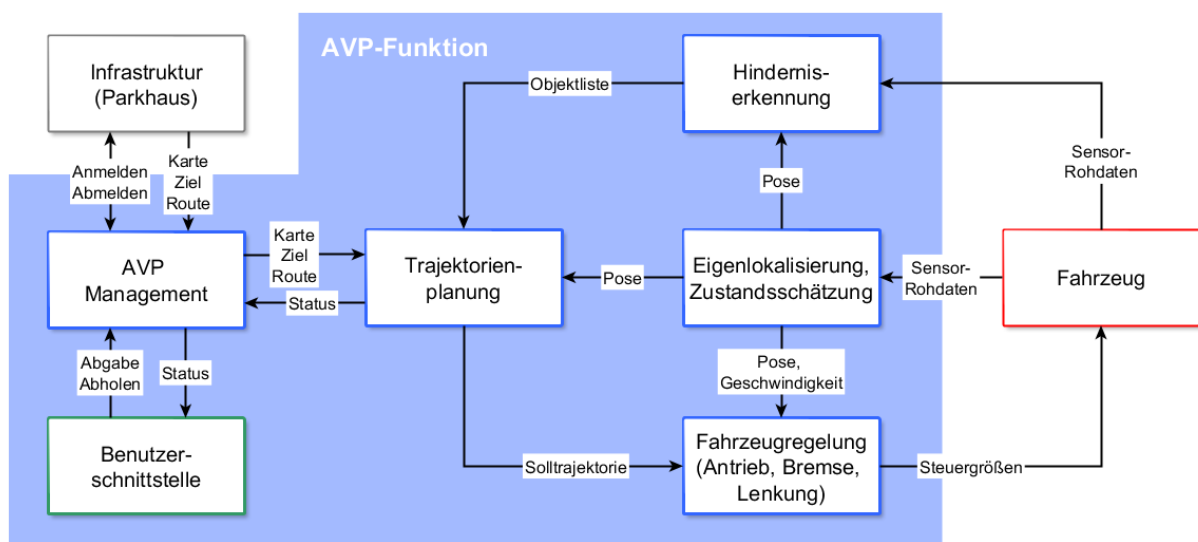


Bild 1: Funktionale Architektur der AVP-Funktion

Aus der Architektur der Funktion wird die zentral wichtige Rolle der Eigenlokalisierung ersichtlich. Von dieser ist sowohl die Trajektorienplanung als auch die Ausführung der Fahrmanöver über die Fahrzeugregelung abhängig. Ohne präzise Eigenlokalisierung ist das erfolgreiche Erreichen des Zielpunktes im Parkhaus nicht möglich.

Komponente Eigenlokalisierung

Da auch bei niedrigen Geschwindigkeiten die Querführung des Fahrzeug in kurzen Taktzeiten auf Kurs halten muss, ist eine ausreichend genaue Posenschätzung in ebenso kurzen Taktzeiten erforderlich. Verfahren zur Ermittlung der Pose ohne GPS berechnen diese oft auf Basis von Kamerabildern, in denen kartierte oder erlernte Objekte, z.B. Gebäudeteile oder QR-Codes an Wänden, erkannt werden. Diese Berechnungen hängen

von der Bildrate der Kamera sowie von der Verfügbarkeit bekannter Objekte ab, sind meist sehr aufwändig und können die Pose zwar mit hoher Genauigkeit, jedoch nicht mit der benötigten Aktualisierungsrate liefern. Deshalb muss der Zeitraum zwischen zwei absoluten Posen mit der Schätzung der Relativbewegung überbrückt werden. Daher gilt: Je besser die Schätzung der Relativbewegung ist, desto seltener muss eine Schätzung der absoluten Pose erfolgen.

Das bekannteste Verfahren zur Schätzung der Relativbewegung ist die radbasierte Odometrie. Hierbei wird ausgehend von den einzelnen Raddrehgeschwindigkeiten die Längsgeschwindigkeit und Gierrate des Fahrzeugs und nach Integration die XY-Position sowie der Gierwinkel geschätzt. Die Berechnungen hierzu sind wenig aufwändig und liefern aktualisierte Daten in sehr kurzen Taktzeiten. Während dieses Verfahren auf geraden Strecken und bei korrekt angenommenem Reifenradius sehr gute Ergebnisse liefert, zeigen sich bei Kurvenfahrten und auf Rampen deutliche Schwächen. Die Quer- und Vertikalbewegung des Reifens kann über die Drehzahlsensoren nicht aufgenommen werden, womit es vor allem in parkhausüblichen engen Kurven sowie beim Wechsel zwischen Parkhausebenen zu starken Abweichungen zwischen geschätzter und tatsächlicher Pose kommt.

Visual Inertial Odometry-Algorithmus

Als Alternative entwickelt Assystem ein Verfahren, dass die relative Pose auf Basis der Beschleunigungen und Drehraten der inertialen Messeinheit (IMU) schätzt und über die Bilder einer Frontkamera abstützt. Bei der sogenannten Visual Inertial Odometry (VIO) werden charakteristische Bildbereiche (Features) identifiziert und über mehrere Bilder zeitlich verfolgt, was in Bild 2 exemplarisch dargestellt ist. Über bekannte Parameter der Kamera wird die Bewegung der Features in eine Bewegung des Fahrzeugs umgerechnet. Diese wird wiederum verwendet, um die ursprüngliche, fehlerbehaftete Schätzung auf Basis der IMU-Daten zu korrigieren. Das adaptive Verfahren speichert die ermittelten IMU-Sensorfehler und verrechnet sie in Folge sofort mit den Sensorrohdaten, wodurch korrigierte IMU-Daten mit hoher Aktualisierungsrate zur Verfügung stehen. Ein Ausfall der Kamera oder mäßige Bildqualität sind dabei unkritisch, da in diesem Fall lediglich keine weitere Adaption stattfindet. Die Verfügbarkeit der Posenschätzung hängt somit hauptsächlich von der meist sehr robusten IMU ab, die nur wenig durch die Umwelt beeinflusst wird. Da die IMU alle sechs Freiheitsgrade des Fahrzeugaufbaus aufnimmt und die Frontkamera vor allem Quer- und Vertikalbewegung gut erfassen kann, verspricht das Verfahren eine deutlich bessere Posenschätzung in Kurvenfahrten und auf Rampen.



Bild 2: Virtuelles Kamerabild aus DYNAanimation mit Feature Tracks

3. Virtuelle Entwicklung und Test

Zielstellung

Ziel der stark virtualisierten Entwicklung ist es, Komponenten und Teilsysteme soweit vorzubereiten, dass der Realversuch hauptsächlich zur Validierung und Feinabstimmung sowie zur Bewertung der eingesetzten Verfahren hinsichtlich deren Praxistauglichkeit dient. Um die im vorigen Kapitel beschriebenen Einflüsse auf die AVP-Funktion in der Simulation berücksichtigen zu können, sind insbesondere die Dynamik des Fahrzeugs, dessen Sensorik sowie dessen Umgebung abzubilden. Auf diese Simulationsbestandteile wird nach einem Überblick über die Tool-Basis genauer eingegangen.

Ein wesentlicher Vorteil der virtuellen Entwicklung ist die dauerhafte Verfügbarkeit von „Ground Truth“ Daten in der Simulation, welche in Realversuchen nur mit großem Aufwand erzeugt werden können.

Tool-Basis

Als Grundlage für die Testumgebung kommt das Simulationsframework DYNA4 von TESIS zum Einsatz. Der strukturierte und modulare Aufbau der Simulationsmodelle ermöglicht die einfache Abbildung von Systemarchitekturen und deren Integration in das virtuelle Fahrzeug. Die Simulationsmodelle basieren auf Simulink, was eine flexible Integration von Funktionsimplementierungen ermöglicht. So wurde der in C++ implementierte VIO-Algorithmus zunächst als S-Function eingebunden. In späteren Phasen, nachdem die VIO in das Zielsystem auf ROS-Basis (Robot Operating System) integriert ist, werden die in DYNA4 verfügbaren ROS-Schnittstellen zur Datenübertragung genutzt. Die Fahrregler der AVP-

Funktion sind modellbasiert in Simulink implementiert und wurden somit direkt in DYNA4-Modelle integriert. Damit sind sehr kurze Zyklen von Implementierung, Test, Debugging und Re-Test möglich.

Während das Fahrdynamikmodell von DYNA4 die tatsächliche Pose des Fahrzeugs simuliert, erzeugt die zugehörige 3D-Animationslösung DYNAanimation die zur Fahrzeugbewegung konsistenten Kamerabilder. Um die detailreichen Bilder mit hoher Aktualisierungsrate zu generieren, wird eine Grafikkarte mit NVidia GeForce GTX 1070 GPU eingesetzt. DYNAanimation sendet die Bilddaten an ein angeschlossenes ROS-Netzwerk oder an den für Simulink implementierten Bildempfänger, der die Bilddaten im DYNA4-Modell verfügbar macht.

Für die praktischen Abläufe bei Implementierung und Test ist es sehr hilfreich, dass in DYNA4 sowohl vor als auch nach der Simulation benötigte Daten automatisiert verarbeitet und dargestellt werden. Die Abweichungen zur „Ground Truth“ bzw. zum Sollverhalten werden damit schnell sichtbar und können detailliert analysiert werden.

Virtuelles Fahrzeug

Das verwendete Fahrdynamikmodell muss den Zusammenhang zwischen den tatsächlichen Beschleunigungen und Drehraten des Fahrzeugs und dessen Pose physikalisch plausibel abbilden. Da das virtuelle Fahrzeug auch zum Test der Fahrregler verwendet wird und die radbasierte Odometrie als „Benchmark“ für den VIO-Algorithmus dienen soll, muss das virtuelle Fahrzeug im Anwendungsbereich der Parkhaus-Navigation fahrdynamisch dem realen Fahrzeug entsprechen. Das heißt konkret, dass Lenk-, Verzögerungs- und Fahrpedalsignale in virtuellem und realem Fahrzeug zu nahezu identischer Gierrate, Raddrehzahlen sowie Quer- und Längsbeschleunigung führen.

Da das Versuchsfahrzeug bis auf eine geringe Zusatzmasse dem Serienfahrzeug entspricht, konnten Parameter zu Antrieb, Abmessungen und Gewichten aus dem Datenblatt übernommen werden. Zudem wurde eine vereinfachte Parametrierung der Achs- und Lenkinematik aus der Bewegung der Räder bei Lenkradverdrehung im Stillstand ermittelt. Mit einigen weiteren vereinfachenden Annahmen entstand so eine vollständige Parametrierung für den e-Golf. Zur Modellvalidierung wurden Messfahrten mit Manövern im parkhausüblichen Geschwindigkeitsbereich bis 10 km/h durchgeführt, d.h. stationäre Kreisfahrten, Lenkwinkelsprünge, Fahrpedalsprünge und Verzögerungsanforderungen. Es zeigte sich, dass auch mit aufwandsminimierter Parametrierung eine ausreichend gute Übereinstimmung von realem und virtuellem Fahrzeug zu erreichen ist.

Virtuelle Sensorik

Zur Abbildung der IMU stellt DYNA4 ein Sensormodell zur Verfügung, das Beschleunigungen und Drehraten an beliebig einstellbarer Position am Fahrzeug ausgibt. Optional sind ein Downsampling auf den Takt der realen IMU und die Belegung der idealen Signale mit einem zusätzlichen Fehler, z.B. Offset, Drift oder Rauschen möglich, was zum Test der automatischen Fehlerkompensation im VIO-Algorithmus verwendet wird. Die Raddrehzahlen, welche für den Vergleich mit der radbasierten Odometrie benötigt werden, können zunächst als ideale Werte aus den Zustandsgrößen der Räder entnommen werden. Analog zum IMU-Modell werden diesen idealen Signalen Fehlerwerte überlagert.

Die Frontkamera wird über DYNAanimation simuliert, dabei können Auflösung, Öffnungswinkel und Verzerrung eingestellt werden, um Kamera und Objektiv möglichst realitätsnah abzubilden.

Darüber hinaus ist der e-Golf mit 12 Ultraschallsensoren ausgestattet, welche für die AVP-Funktion zur Hinderniserkennung im Nahbereich verwendet werden. Mit einem Modell auf Basis optischer Reflexionen werden diese Ultraschallsensoren in DYNAanimation simuliert. Somit können alle Sensormodelle mit der gleichen Umgebungsdefinition zueinander konsistente Informationen liefern, was vor allem für Fusionsalgorithmen wie der VIO von Bedeutung ist.

Virtuelles Parkhaus

Während für Raddrehzahlsensoren und IMU hauptsächlich die Beschaffenheit der Fahrbahnoberfläche relevant ist, muss für Kamera und auch Ultraschallsensor das Parkhaus detailliert als 3D-Modell abgebildet werden. DYNA4 stellt für den Test von Fahrerassistenzfunktionen ein virtuelles Parkhaus mit mehreren Ebenen und typischen Elementen wie Pfeilern, Fahrbahnmarkierungen, Rampen, Beschilderung und Beleuchtung zur Verfügung. Dieses generische Parkhaus, zusammen mit dem virtuellen AVP-Prototyp in Bild 3 gezeigt, genügt für eine Vielzahl an Tests.



Bild 3: Virtuelles Fahrzeug im DYNA4-Parkhaus

So können Einflüsse von Beleuchtungen inklusive der Fahrzeugscheinwerfer, die Erkennung und Verfolgung charakteristischer Features in Kamerabildern, Odometrie-Algorithmen, Hinderniserkennung sowie die Performance von Fahrreglern bereits in dieser Umgebung geprüft werden.

Für virtuelle Tests der integrierten AVP-Funktion, bei denen charakteristische Merkmale und die Kartierung eines Parkhauses erforderlich sind, müssen aber reale Parkhäuser in der virtuellen Welt abgebildet werden. Hierzu entwickelt Assystem Germany zusammen mit der Firma Promotives ein Verfahren zur teilautomatisierten Virtualisierung von Parkhäusern. Grundlage sind hochaufgelöste Laserscans, die Promotives zur präzisen Kartierung der Parkhäuser durchführt. Aus den Punktwolken werden Flächen und Objekte extrahiert, wie in Bild 4 dargestellt. Texturen und Farben, die der Laserscanner nicht erfassen kann, werden mit einer Fotokamera aufgenommen. Notwendige Metainformationen, z.B. die Bedeutung von einzelnen Objekten oder die Befahrbarkeit und Fahrtrichtung von Flächen, müssen manuell zugewiesen werden. Aus der entstandenen Karte lässt sich eine Straßennetzdefinition im OpenDRIVE-Format ableiten, welches nativ von DYNA4 unterstützt wird. Parallel wird aus den Objekt- und Texturinformationen ein 3D-Modell erzeugt, das zur Darstellung in DYNAanimation dient. Der Zusatzaufwand für die Virtualisierung gegenüber der reinen Kartierung liegt damit hauptsächlich bei den Texturen.

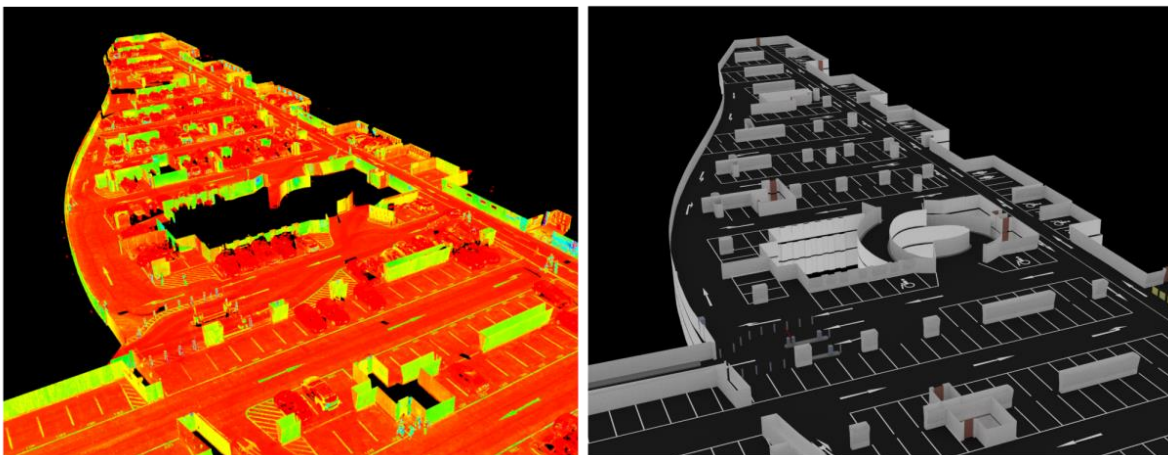


Bild 4: Laserscan-Punktwolke und extrahierte Objekte eines realen Parkhauses

4. Vorläufige Ergebnisse und Ausblick

Bild 5 zeigt einen Vergleich zwischen reiner IMU-Integration, VIO-Algorithmus und radbasierter Odometrie. Während die Rad-Odometrie wenig Fehler bei der Geschwindigkeitsschätzung macht, entsteht die Positionsabweichung durch den Gierwinkel. Bei der reinen IMU-Integration führt die mehrfache Integration von Sensorfehlern zu

unbrauchbaren Positionsschätzungen. Der VIO-Algorithmus kann hingegen die Sensorfehler der IMU gezielt kompensieren und erreicht sehr gute Schätzwerte. Eine Kombination aus Rad-Odometrie und VIO könnte zudem die Schätzung der Geschwindigkeit und damit auch der Position noch robuster machen.

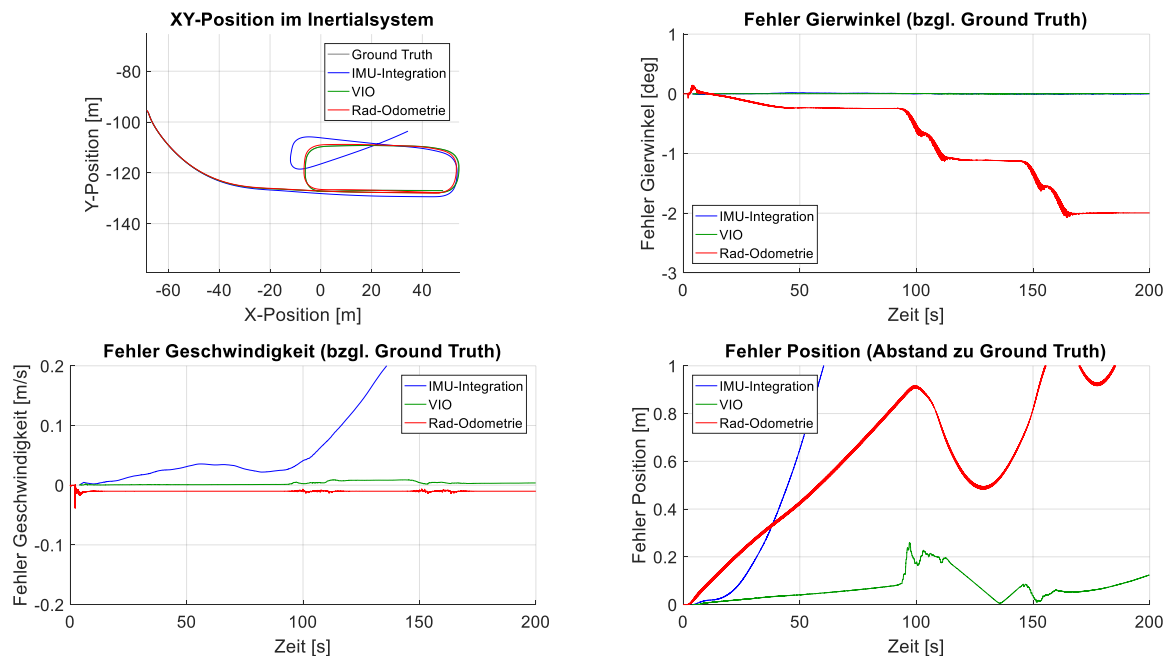


Bild 5: Vergleich von IMU-Integration, VIO-Algorithmus und Rad-Odometrie bzgl. Schätzungsfehler gegenüber "Ground Truth"

Es ist allerdings nicht zu erwarten, dass die geforderte Präzision der Schätzung der Relativbewegung über mehrere hundert Meter durch enge Kurven und über Rampen hinweg erzielt werden kann. Es ist stattdessen davon auszugehen, dass in Parkhäusern in kürzerem Abstand kartierte und wiedererkennbare Objekte zur absoluten Referenzierung platziert werden müssen. Die mögliche Performance der Relativbewegungsschätzung ist dann maßgebend dafür, an welchen Stellen in einem Parkhaus unbedingt eine absolute Lokalisierung erforderlich ist, um eine durchgängige Eigenlokalisierung in ausreichender Präzision zu gewährleisten.

Die beschriebenen virtuellen Methoden unterstützen somit nicht nur die Funktionsentwicklung für AVP, sondern auch die Bewertung und Verbesserung von Parkhäusern für diese Anwendung.