© dSpace

GPU-BESCHLEUNIGTES RAYTRACING

Realitätsnahe Sensordaten in **Echtzeit**

Die Absicherung von Sensoren und dazugehöriger Algorithmen ist für die Fahrsicherheit von enormer Bedeutung. Um möglichst viele Szenarien und Testkilometer effizient absichern zu können, werden neben echten Testfahrten verstärkt Methoden der virtuellen Validierung mittels Raytracing eingesetzt.

Moderne Fahrzeuge werden mit einer stetig steigenden Zahl fortschrittlicher Sensoren ausgestattet. Als elektronische Sinnesorgane sind sie wesentliche Komponenten elektronischer Regelsysteme und übernehmen wichtige Aufgaben für Sicherheitssysteme wie Notbremsassistenten oder Totwinkelwarner. In selbstfahrenden Autos sind sie die Basis für die Entwicklung von Lösungen für das autonome Fahren.

Das virtuelle Testen ermöglicht reproduzierbare Testszenarien und eine kostengünstige Möglichkeit, Millionen von Testkilometern zu absolvieren. Daten mit hoher Rate zu berechnen, die so realistisch sind, dass Algorithmen sinnvoll getestet werden können, ist die große Herausforderung für die Simulationssoftware. Dies gilt auch für Radar- und Lidarsimulationen. Eine Vollwellensimulation ist aufgrund der hohen Rechenzeit ungeeignet. Die Rasterisierungstechnik, die für die Simulation von Kamerabildern und in Videospielen verwendet wird, ist zwar sehr schnell, kann aber aufgrund prinzipbedingter Einschränkungen nicht die nötige Realitätsnähe erreichen.

Dieser Beitrag beschreibt anhand von Beispielen die Vorteile von Raytracing bei der Simulation von Radar- und Lidarsensoren und zeigt auf, wie moderne Methoden in Verbindung mit aktueller Hardware die Simulation in Echtzeit ermöglichen.

Raytracing für Sensorsimulationen

Radar- und Lidarsensoren senden aktiv elektromagnetische Wellen aus und erstellen anhand des Echos ein Abbild der Umgebung. Um diesen Vorgang zu simulieren, ist es notwendig, die Ausbreitung einzelner elektromagnetischer Wellen durch eine 3D-Szenerie präzise zu verfolgen und jeden Interaktionspunkt mit der Umgebung zu berücksichtigen. Hier sind u. a. Reflexion, Transmission und Beugung möglich. Aufgrund der geringen Wellenlänge beider Sensortypen können die Wellenfronten mittels einer Vielzahl von Strahlen approximiert werden.

© Carl Hanser Verlag, München

Es existieren viele verschiedene Raytracing-Algorithmen, die auf unterschiedliche Anwendungszwecke optimiert sind. Grundsätzlich werden Strahlen von einer bestimmten Quelle aus in die Szenerie gesendet und Schnittpunkte mit den Objekten berechnet. Bei jedem Schnittpunkt können beliebige Berechnungen durchgeführt und optional neue Strahlen erzeugt werden. Die Ergebnisse werden dann nach frei wählbaren Kriterien aufsummiert, um bspw. ein Bild zu berechnen. Das Ergebnis der Radar- und Lidarsimulation ist eine Kanalimpulsantwort, die Informationen über die Interaktion der ausgesendeten Strahlen mit der Umgebung enthält. Daraus lassen sich „Echos" wie 3D-Punktwolken und Spannungsverläufe an Detektorelementen berechnen.

Da die Wellenfronten kontinuierlich sind, können in der Praxis auch sehr kleine Objekte detektiert werden, vorausgesetzt, genug Energie wird reflektiert. Ein Beispiel bilden reflektierende Pfosten am Straßenrand, die in großer Entfernung nur einen sehr kleinen Teil des Sensorsichtfelds einnehmen (Bild 1). Diese Objekte könnten mit einer sehr hohen Abtastrate detektiert werden, was jedoch zu rechenaufwendig wäre. Mittels Raytracing ist es möglich, die Abtastungsgenauigkeit der Szene winkelabhängig zu variieren. Durch gezieltes Anschießen einzelner Geometrien können auch sehr kleine, weit entferne Objekte zuverlässig erkannt werden.

Verschiedenste Scanmuster

Auf dem Lidar-Markt gibt es aktuell viele unterschiedliche Sensortechnologien, die sich u. a. in Anzahl und Anordnung der Pixel unterscheiden. Mit Raytracing ist es möglich, für jeden Pixel des Lidarsensors Richtungswinkel, Aussendezeitpunkt und Ausgangsintensität zu definieren. So ist es möglich, auch dichte, nicht-lineare Scanmuster zu simulieren. Diese sind u. a. für MMT (Micro Motion Technology)-basierte Lidarsysteme der Firma Cepton wichtig. Bild 2 zeigt eine Simulation des Cepton Vista-P60 Sensors.

Die Auswirkungen des Aussendezeitpunkts lassen sich an Lidarsensoren mit einem rotierenden Kopf veranschaulichen. Während sich der Sensorkopf dreht, bewegen sich Objekte weiter. Die daraus resultierende Verzerrung zeigt Bild 3. Bei komplexeren Abtastmustern ist der Effekt weniger anschaulich, kann aber in gleicher Weise durch das Raytracing reproduziert werden.

Frequenzabhängige Materialeigenschaften

Wie eine Oberfläche elektromagnetische Wellen reflektiert, hängt vom Material und der Wellenlänge ab. Für die Radarsimulation wichtige Materialparameter wie die relative Dielektrizitätskonstante und der Verlustfaktor unterscheiden sich für die verschiedenen gebräuchlichen Frequenzen (insbesondere 24 GHz und 77 GHz). Auch die Lidarsimulation muss die Wellenlänge (meist um 905 nm oder 1550 nm) berücksichtigen, denn Licht im Nahinfrarotbereich verhält sich anders als Licht im sichtbaren Bereich. Dies wird insbesondere bei Vegetation deutlich. Deshalb lassen sich Modelle, die in der Computergrafik für sichtbares Licht entwickelt wurden, nur bedingt auf die Sensorsimulation übertragen.

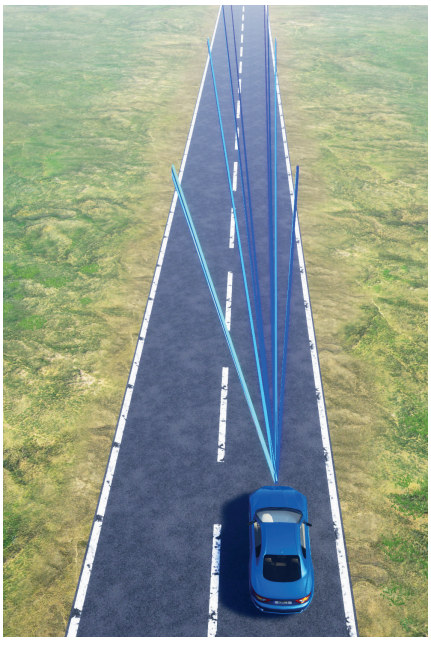

Bild 1: Eine adaptive Abtastung der Szene ermöglicht das zuverlässige Detektieren von kleinen, weit entfernten Objekten wie reflektierenden Pfosten am Straßenrand. © dSpace

Bild 2: Simulierte Punktwolke eines Cepton Vista-P60 Lidar. Der zu jedem einzelnen Punkt gehörende Raytracing-Strahl kann individuell definiert werden, wodurch die exakte Nachbildung des Scanmusters möglich wird. © dSpace

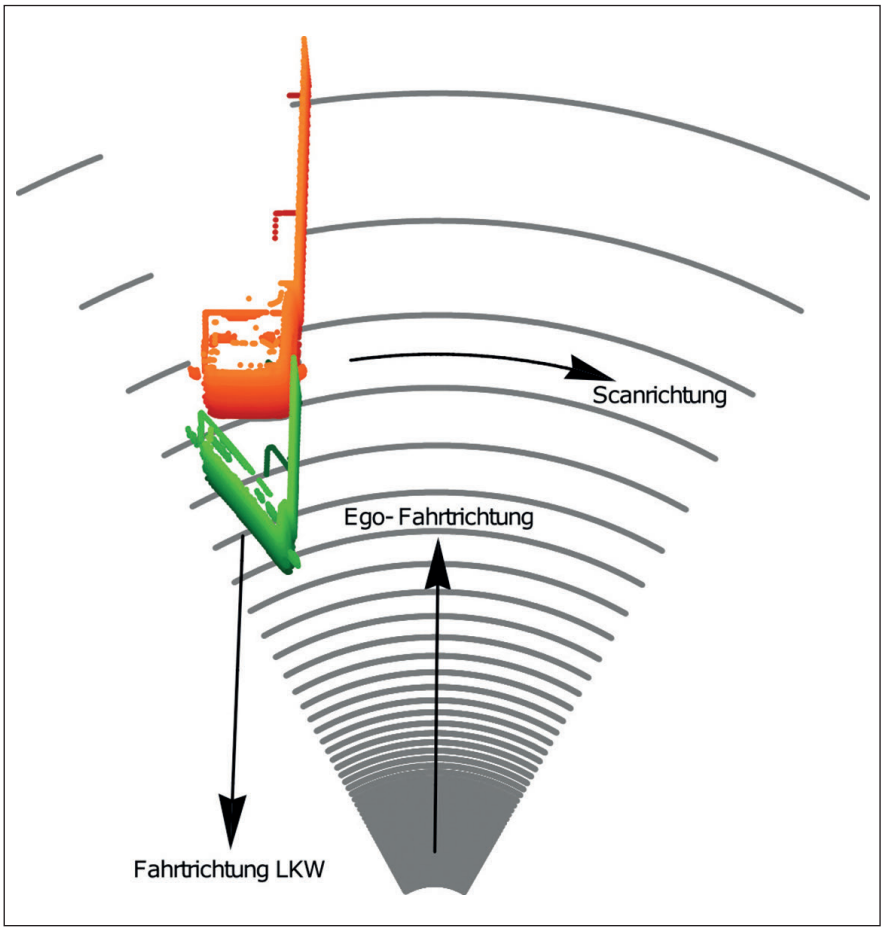

Bild 3: Durch die relative Bewegung von Ego-Fahrzeug (150 km/h) und entgegenkommendem Lkw (100 km/h) erscheint die Punktwolke eines Sensors mit 15 Hz rotierendem Kopf verzerrt (grün) im Vergleich zu einer instantanen Aufnahme (rot). © dSpace

Der Raytracer berücksichtigt Oberflächenmaterial, Wellenlänge und Einfallsrichtung des Strahls, um neue Strahlen in Reflexionsrichtung auszusenden und die Intensität der Reflexion zu berechnen. Bei der Lidarsimulation kann der Raytracer auf Messwerte eines Gonioreflektometers zurückgreifen, die das Reflexionsverhalten einer Oberfläche im Nahinfrarotbereich vollständig beschreiben. Dieser allgemeine Ansatz schließt auch bekannte Spezialfälle wie diffuse und spiegelnde Reflexion oder Retroreflexion ein.

Für Radarwellen hat sich eine Kombination aus Wellenoptik (Physical Optics, PO) und Strahlenoptik (Geometrical Optics, GO) zur Berechnung des elektrischen Feldes bewährt. Daraus ergeben sich die Radarquerschnitte der Objekte und die empfangene Signalstärke.

GO eignet sich zur Berechnung des Felds nach einer direkten Reflexion in die Hauptabstrahlrichtung (Einfallswinkel = Ausfallswinkel), während PO auch diffuse Reflexionen, etwa zurück zur Empfangseinheit des Sensors bestimmen kann. Durch eine intelligente Priorisierung der weiterverfolgten Strahlen kann die Berechnungskomplexität der Simulation kontrolliert werden. Bild 4 zeigt die Verwendung von GO und PO.

Raytracing simuliert Ghost Targets

Die Reflexion an mehreren Objekten wird als „Mehrwegeausbreitung" bezeichnet. Einige der reflektierten Pulse treffen mit geringer zeitlicher Verzögerung auf die Empfangsantennen des Sensors. Da der echte Sensor nur die Zeitdifferenz und den Eintrittswinkel misst, generiert er bei einer Mehrwegeausbreitung so genannte „Ghost Targets", also Ziele, die der Sensor an falscher Stelle verortet. Bild 5 zeigt die Simulation eines Scheinziels mit Raytracing.

Simulation des Mikrodopplereffekts

Da ein Radarsensor den Dopplereffekt einzelner Reflexionen messen kann, ist es möglich, zum Beispiel drehende Autoreifen oder schwingende Gliedmaßen von Fußgängern anhand der unterschiedlichen Geschwindigkeiten zu erkennen. Dieser Effekt wird auch als Mikrodoppler bezeichnet. Mit Hilfe von Raytracing und spezieller Algorithmen kann die Geschwindigkeit zwischen zwei beliebigen Punkten in der Szene berechnet werden. Hierdurch kann für Direktreflexion und Mehrwegeausbreitung die korrekte Dopplerverschiebung eines Ausbreitungspfades bestimmt werden.

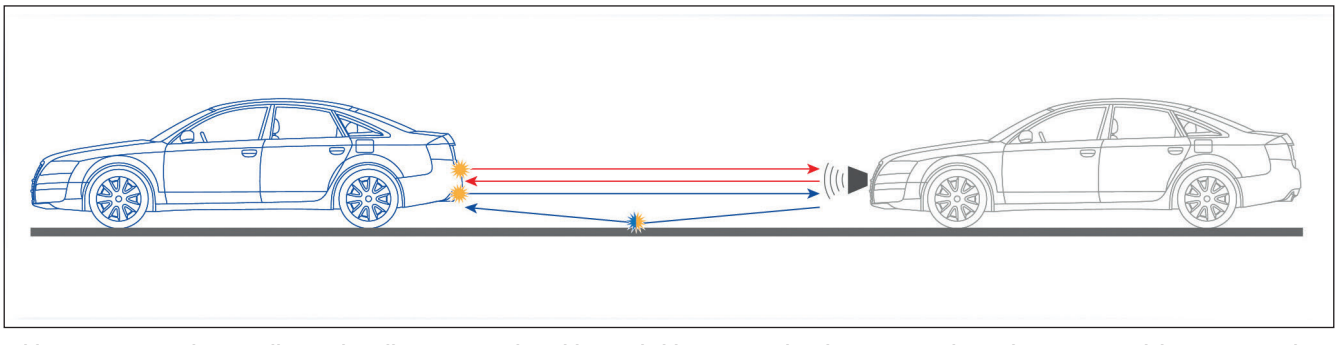

Bild 4: Ein Raytracer kann Wellenoptik (gelber Stern) und Strahlenoptik (blauer Stern) kombinieren, um die Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen in einer Szene zu verfolgen. Der blaue Pfad zeigt, wie die elektromagnetische Welle an mehreren Oberflächen reflektiert und vom Sensor indirekt empfangen werden kann. © dSpace

© Carl Hanser Verlag, München

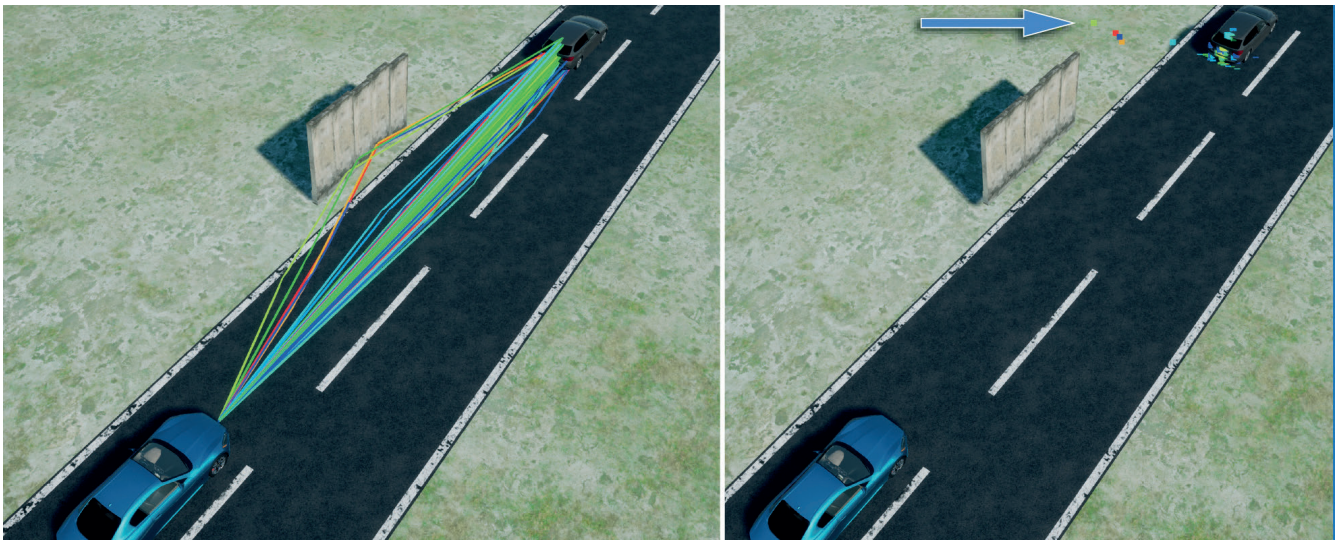

Bild 5: Links: Radar Ausbreitungspfade, die mittels Raytracing simuliert wurden. Rechts: Die detektierten Ziele des Radarsensors. Mehrere Ziele befinden sich scheinbar hinter der Wand. © dSpace

Um den Mikrodopplereffekt bei Fußgängern zu simulieren, ist die Simulation dynamischer Meshes notwendig, die nicht nur ihre Transformationen, sondern auch ihre Form zur Laufzeit verändern. Geschachtelte Beschleunigungsstrukturen ermöglichen es, innerhalb des Raytracers diese Meshes für jedes Bild zu aktualisieren, ohne die gesamte Szene neu bauen zu müssen. So wird eine deutlich höhere Leistung erreicht.

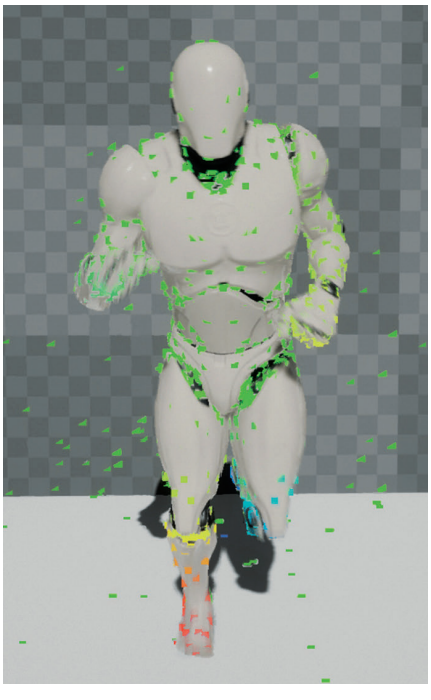

Bild 6: Ein joggender Fußgänger wird von vorne von einem Radarsensor angestrahlt. Hier ist zu erkennen, dass Teile des Objekts auf den Sensor zukommen (Negativer Doppler, Rot) während andere Gliedmaßen sich entfernen (Positiver Doppler, Blau). © dSpace

Bild 6 zeigt simulierte Relativgeschwindigkeiten für Reflexionspunkte auf einem Fußgänger im dSPACE Raytracer.

Echtzeitfähiges Raytracing mit Hardware-Unterstützung

Raytracing-Algorithmen werden seit vielen Jahren für physikalische Simulationen verwendet, jedoch waren diese langsam und meist auf einfache 3D-Szenarien mit wenigen, statischen Objekten begrenzt.
Seit Kurzem ist es möglich, das Raytracing mit Hilfe dedizierter Grafikkarten und speziell integrierter Hardware-Einheiten soweit zu beschleunigen, dass selbst komplexe 3D-Szenarien in Echtzeit berechnet werden können. Dedizierte Hardware-Einheiten auf der Grafikkarte übernehmen die Schnittpunktberechnung zwischen Strahlen und Geometrien sowie das Bauen und Traversieren von Beschleunigungsstrukturen.

Fazit

Die Absicherung des autonomen Fahrens erfordert synthetisch generierte Sensordaten, die realistisch sind und in Echtzeit berechnet werden können. Dieser Beitrag zeigt, wie wichtige Phänomene mit Raytracing performant simuliert werden können. Dazu gehören der Einfluss von kleinen Objekten, der korrekten Aussendezeitpunkt, Materialeigenschaften, Ghost Targets und Mikrodopplereffekte. dSpace setzt bereits seit einigen Jahren auf Raytracing-Technologie mit Hardware-Beschleunigung, um die oben genannten Effekte und weitere Sensoreigenschaften effizient simulieren zu können und arbeitet kontinuierlich an neuen Konzepten, beispielsweise der Abbildung von lokalen Wettereffekten und Sensor-Interferenz.
Schnellere Grafik-Hardware sowie weitere Optimierungen werden dazu beitragen, noch genauere Daten in Echtzeit simulieren zu können. Es ist zu erwarten, dass auch zukünftige Entwicklungen vermehrt auf Raytracing setzen. ■ (oe)

www.dspace.com

Michael Epping ist Applikationsingenieur für Sensorsimulation bei dSPACE.

Philipp Meyer ist Applikationsingenieur für Sensorsimulation bei dSPACE.

Caius Seiger ist operativer Produktmanager Sensor Simulation bei dSPACE.