
FIR (Fern-Infrarot)- Kameras für das sichere autonome Fahren

ADASKY – Team*

Der Wettlauf um das vollständig autonome Fahrzeug (AF) geht weiter. Doch der aktuelle Stand der Sensortechnologien macht weitere Fortschritte hin zum AF zu einer großen Herausforderung. Die am häufigsten verwendeten Sensorlösungen – Radar, CMOS-Kameras und LIDAR – weisen eine tiefgreifende Lücke im Hinblick auf ihre Fähigkeiten auf. Derzeit kann keine dieser Lösungen (einzeln oder in Kombination) autonomen Fahrzeugen angemessen und zuverlässig einen vollständigen Abdeckungsumfang ihrer Umgebung bei allen Wetter- und Lichtverhältnissen bieten.

So kann beispielsweise das Radar Objekte auf große Entfernungen hinreichend gut erfassen, sie jedoch nicht eindeutig identifizieren. Kameras sind deutlich besser geeignet, Objekte zu identifizieren, erlauben dies jedoch lediglich auf kurze Distanz und sind unter einigen kritischen Umgebungsbedingungen quasi blind. Viele Automobilhersteller kombinieren daher ihre Entwicklungsanstrengungen für Radar- und Kamera, um eine vollständigere Erfassung und Abdeckung der Fahrzeugumgebung zu gewährleisten:

Ein Radarsensor erfasst ein noch weit entferntes Objekt auf der Straße; kommt dieses näher, so liefert die Kamera ein genaueres Bild davon. Für detailliertere Informationen über weit entfernte Objekte kann eine Radarerkennung mit großem Sichtfeld durch den Input einer Kamera mit eingengtem Sichtfeld ergänzt werden.

* ADASKY, Yokneam Illit 20692, Israel

In den meisten autonomen Fahrzeugen stellen Lidar (engl.: Light detection and ranging) - Sensoren eine weitere wesentliche Schlüsseltechnologie zur Wahrnehmung dar, aber es gibt Situationen, in denen sie nicht funktionieren. Wie beim Radar sendet strahlt das Lidar Signale aus und verwendet die reflektierten Signale, um den Abstand zu einem bestimmten Objekt zu ermitteln. (Radar verwendet hierzu Radiowellen, Lidar arbeitet mit Laser oder Lichtwellen). Lidar - Sensoren können im Vergleich zum Radar ein umfassenderes Blickfeld bieten, aber die Kosten dieser Lösung machen die Anwendungen im Massenmarkt unerschwinglich. Die Winkelauflösung bei Lidar muss noch verbessert werden, um kleine und/oder entfernte Objekte identifizieren zu können. Bei der Entwicklung neuer Lidar-Sensoren müssen sich die Hersteller zwischen augensicherer Wellenlänge, Preis, Auflösung und Reichweite entscheiden. Es ist bekannt, dass die augensichere Wellenlänge (im Wellenlängenbereich um 1550 nm) eine teure Hardware erfordert; allerdings sind bei nicht-augensicherer Wellenlänge (nahes Infrarot), die günstiger herzustellen ist, durch entsprechende Bestimmungen niedrigere Emissionsleistungen gefordert, was wiederum zu einer geringeren Erfassungsreichweite führt. Daher können Lidar - Hersteller derzeit nur Systeme produzieren, die entweder unrealistisch teuer oder aber kurzreichweitig sind und von denen keines eine Level-5 Autonomiestufe (Vollautomatisierung, kein Fahrer erforderlich) für den Massenmarkt bieten kann.

Ein anderer Sensor ist notwendig, um die Autonomie-Stufe 5 zu ermöglichen

Laut der "U.S. Energy Information Administration" ist die Level 5 - Autonomie als vollständige Automatisierung definiert, was bedeutet, dass "das Fahrzeug alle Fahrfunktionen unter allen Bedingungen auszuführen in der Lage ist." D.h. dass auch unter widrigen Wetterbedingungen und bei Nacht ein autonomer Fahrbetrieb gewährleistet sein muss.

Eine effektive Wahrnehmung auch unter schwierigen Witterungsverhältnissen ist für die Entwicklung autonomer

Fahrzeuge von zentraler Bedeutung, da sie als häufigste Ursache bei Fahrzeugunfällen betrachtet werden können.

Die „American Meteorological Society“ bezeichnet widrige Wetterbedingungen als Hauptursache von Verkehrsunfällen, die jährlich zwischen 480.000 und 800.000 Verletzte und 7000 Tote fordern, sowie Kosten in Höhe 22-25 Milliarden US-Dollar verursachen. Wildtiere stellen ebenfalls eine andauernde Gefährdung für Fahrzeuge dar: Die „Federal Highway Administration“, eine Behörde des US-Verkehrsministeriums, schätzt dass es jedes Jahr allein in den USA 1-2 Millionen Kollisionen zwischen Fahrzeugen und größeren Tieren gibt. Das Fahren bei Dunkelheit stellt eine weitere bekannte Gefährdung dar, insbesondere wenn Fahrzeuge und Fußgänger aufeinandertreffen: Das Versicherungsinstitut für Straßenverkehrssicherheit meldet, dass die Zahl der getöteten Fußgänger bei Anbruch der Dunkelheit am stärksten zunimmt. Tatsächlich passieren über 75% der tödlichen Unfälle mit Fußgängern bei Nacht.

Es ist offensichtlich, dass die momentan verwendeten Sensoren (Radar, Kameras und Lidar) derzeit (noch) nicht über das erforderliche Erkennungsvermögen verfügen, um unter diesen Gegebenheiten einen ausreichenden Abdeckungsumfang bereitzustellen:

Bis diese Schwachstellen durch eine umfassendere Sensorlösung behoben werden können, können sich die Automobilhersteller nicht erhoffen, ihren Zielen zur Erreichung der vollständigen oder nahezu vollständigen Autonomie näher zu kommen und zeitnah mit selbstfahrenden Autos den Massenmarkt zu erschließen. Sicheres autonomes Fahren (Level-3-Autonomie oder höher) wird nur dann möglich sein, wenn die Automobilhersteller eine Lösung finden, um die verbliebenen Lücken zu schließen, die den üblicherweise verwendeten Sensoren anhaften.

Inzwischen werden vielfach FIR (fernes Infrarot) – Kameralösungen als eine vielversprechende Technologie untersucht, welche eben diejenigen Leistungsmerkmale bereitstellt, die andere Sensoren nicht bieten können.

Die FIR Technologie bietet die sensorische Leistungsfähigkeit, welche die Level-5-Autonomie erfordert

FIR-Sensoren sind in der Lage, auch bei ungünstigen Wetterbedingungen und bei Nacht eine zuverlässige und genaue Erkennung zu gewährleisten, da sie auf eine zusätzliche Informationsebene zugreifen, die bei anderen Sensoren nicht genutzt wird.

Im Gegensatz zu Radar- und Lidar - Sensoren, die Signale sowohl senden als auch empfangen, sammelt eine FIR - Kamera passiv Signale, indem sie die thermische Energie erfasst, die von Objekten abgestrahlt wird. Indem dieses Infrarotspektrum, welches im Vergleich zu sichtbarem Licht bei viel höheren Wellenlängen liegt, vermessen wird, greifen FIR - Kameras auf ein anderes Band im elektromagnetischen Spektrum zu, als dies bei anderen Sensortechnologien der Fall ist. Auf diese Weise kann die FIR-Kamera eine neue Informationsebene generieren, die es ermöglicht, Objekte zu erfassen, die für Radar, Kameras oder Lidar sonst nicht wahrnehmbar wären. Zusätzlich zum Auslesen der thermischen Signatur eines Objektes können FIR-Kameras auch den Emissionsgrad erfassen, also die Rate, mit der die Wärmestrahlung abgegeben wird. Da jedes Objekt einen anderen Emissionsgrad hat, kann eine FIR-Kamera ein beliebiges Objekt, ob lebend oder nicht, auf seinem Weg sofort erkennen und einordnen.

Passives Verhalten ist ein weiterer Vorteil, den FIR gegenüber anderen Sensorlösungen bietet. Zum Beispiel verwenden viele autonome Fahrzeuge derzeit Lidar und/oder Radar; diese stellen beide jedoch aktive, Energie abstrahlende Ausführungsweisen dar. Als solche kann das auf dem einen Fahrzeug installierte und arbeitende Lidar und/oder Radar das eines anderen vorbeifahrenden Fahrzeuges beeinträchtigen und stören. FIR hingegen kann als passiv arbeitende Technologie die eigene Fahrzeugumgebung erfassen und abdecken, ohne die Sensoren anderer Fahrzeuge zu stören.

Darüber hinaus übertrifft FIR andere Sensorik - Ausführungen, indem es ein unveränderliches Bild unter verschiedenen Beleuchtungsverhältnissen liefert: Die Bildwahrnehmung wird weder durch die Farbe oder den Hintergrund eines Objektes, noch durch die Beleuchtungsrichtung, die Anzahl der Lichtquellen durch gerichtete Reflexion oder durch die vielen Bildunregelmäßigkeiten, die von schwankenden Lichtbedingungen in gewöhnlichen CMOS - Bildern herrühren, beeinträchtigt. Obwohl CMOS-Kameras normalerweise sehr gut zur Erkennung der Fahrspur und andere Straßenmarkierungen geeignet sind, können sie auf Grund der großen Abweichung des visuellen Erscheinungsbildes in CMOS - Bildern selbst bei Tageslicht Schwierigkeiten haben, den befahrbaren Straßenbereich genau zu erfassen. Das Erscheinungsbild der Straße in einem FIR - Bild ist sehr viel konstanter; die Charakteristik bleibt unter vielen unterschiedlichen Lichtverhältnissen mehr oder weniger gleich.

Sowohl durch den Zugriff auf eine neue Informationsebene als auch durch die Erzeugung gleichbleibender Aufnahmen liefert FIR dem autonomen Fahrzeug sehr detailgenaue Bilder. Diese reichhaltige Darstellungsweise verbessert im Gegenzug jedes Merkmal des autonomen Fahrzeugs, welches auf der künstlichen Wahrnehmung durch die Maschine beruht, wie z.B. Objekterkennung auf der Straße, Klassifizierung, Intentionserkennung, Spurhaltung, Entfernungsabschätzung, semantischer Segmentierung und SLAM (Simultaneous Localization And Mapping = simultane Lokalisierung und Kartierung).

Thermische Sensoren verfügen über hoch entwickelte Leistungsmerkmale auch bei ungünstigen Wetterverhältnissen, was teilweise darauf zurückzuführen ist, dass sie auf einen bislang ungenutzten Bereich des elektromagnetischen Spektrums zugreifen. Der größte Teil des elektromagnetischen Spektrums wird durch die Erdatmosphäre blockiert, nur in einem schmalen Spektralfenster wird die E/M-Strahlung hindurch gelassen (siehe Bild 1). Das Fenster des sichtbaren Lichtes umfasst ungefähr den Wellenbereich von 400 – 700 nm, das Infrarotfenster, welches üblicherweise in kostengünstigen Wärmebildkameras Anwendung findet, erstreckt sich von 8 – 12 μm . Es gibt viele Faktoren, welche die Sicht nachteilig beeinflussen können, wie z.B. bestimmte atmosphärische

Aerosol- oder andere Luftschadstoffeigenschaften (z.B. mittlere Tröpfchen- oder Luftpartikelgröße, Dichte oder andere mikrophysikalische Eigenschaften von Luftpartikeln). Bei mäßigem Nebel z.B. wächst die atmosphärische Undurchlässigkeit im sichtbaren Wellenlängenbereich deutlich schneller an, da die Wellenlängen des sichtbaren Lichtes kleiner als die Aerosolradien sind und daher stärker streuen. Wenn der Nebel sehr dicht wird, und die Wassertröpfchen durch Anlagerung größer werden, so wird die Sichtbarkeit im ganzen Spektralbereich mehr oder weniger gleichmäßig stark herabgesetzt. In Bild 2 ist das Leistungsvermögen von FIR bzw. CMOS für verschiedene problematische Umgebungsbedingungen gegenübergestellt.

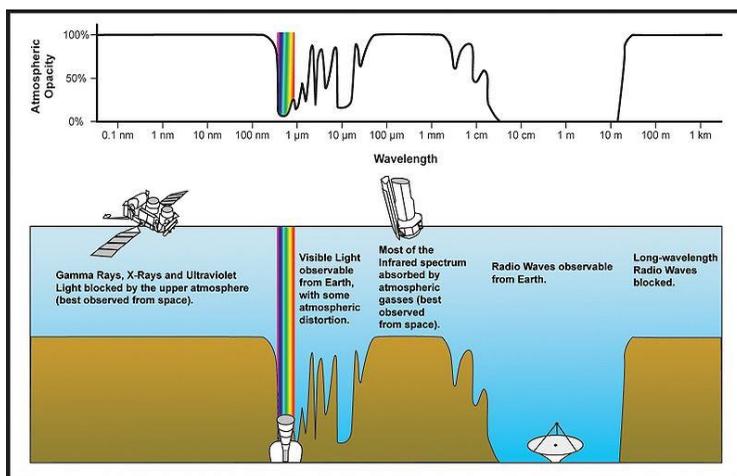


Bild 1. Schematisierte Darstellung der Undurchlässigkeit der Erdatmosphäre für elektromagnetische Strahlung unterschiedlicher Wellenlänge. (Quelle: Wikipedia, Originalbild NASA, "atmospheric electromagnetic transmittance or opacity.jpg")

Ein weiterer Grund, weshalb das FIR-Spektrum für die Bildgebung bei schlechtem Wetter attraktiv ist, liegt in der unidirektionalen Eigenschaft seines Strahlenweges. Im sichtbaren Spektralbereich muss das Licht zwei Wege zurücklegen; erstens von der Quelle (z.B. der Sonne oder dem Lichtstrahl eines Fahrzeuges) zum Objekt und dann, nachdem es vom Objekt reflektiert oder gestreut wurde, hin zur Kamera. Im FIR-Spektrum legt die signifikante Signalkomponente nur einen Weg zurück: Sie wird vom Objekt ausgesendet und gelangt direkt zur Kamera. Da das Licht im FIR-Spektralbereich nur einen Weg zurücklegt, erfährt es nur eine einmalige Dämpfung, außerdem gibt es wesentlich weniger Signale, die von Luftpartikeln in Richtung der FIR-Kamera reflektiert oder gestreut werden. Folglich ist eine FIR-Sensorlösung in der Lage, hochaufgelöste Bilder auch bei schlechtem Wetter zu erzeugen, da es dieses reflektierte oder gestreute Licht ist, welches im sichtbaren Bereich des Spektrums wolkige, neblige, dunstige, staubige oder andere unklare Artefakte erzeugt.

Die beeindruckenden Möglichkeiten zur Temperaturerfassung einer FIR Kamera tragen wesentlich dazu bei, qualitativ hochwertige Bilder zu erzeugen. Moderne FIR- Kameras sind in der Lage, Temperaturunterschiede unter $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$ aufzuzeichnen und ermöglichen kontrastreiche Abbildungen von lebenden Objekten, deren Temperatur sich oft deutlich vom Hintergrund abhebt. FIR - Kameras können Fußgänger aus mehr als 200 Metern Entfernung erkennen (dies wurde kürzlich mit VGA (640x480) FIR-Sensoren und einer 17° Sichtfeldoptik aufgezeigt). FIR basierte Systeme können auch Objekte nachverfolgen, befahrbare Straßenbereiche identifizieren, das Verhalten von Fußgängern analysieren und viele andere Wahrnehmungsfunktionen erfüllen, welche von CMOS-Kameras nur unter idealen Bedingungen ausgeführt werden können, aber nicht bei schwierigen Wetterbedingungen oder nachts.

Zusätzlich dazu, dass andere Sensorlösungen bei widrigen Witterungsverhältnissen und nachts übertroffen werden, verfügen FIR-Kameras über weitere beeindruckende Erkennungsfunktionen, die sie zu einem Wegbereiter für die Ermöglichung von Level-3-Autonomie (und höher) machen. Beispielsweise ist im Falle von dynamischen Lichtverhältnissen, wie direktem Sonnenlicht oder entgegenkommenden Scheinwerfern (was die typischen

Schwachstellen bei Lidar- und CMOS-Kameras sind), die FIR-Kamera stets noch in der Lage, ein qualitativ hochwertiges Bild zu erzeugen. Diese Fähigkeit ist für autonome Fahrzeuge notwendig, um in städtischen Bereichen navigieren zu können. Stellen Sie sich ein Fahrzeug vor, das in einen Tunnel hineinfährt oder diesen verlässt: Die Lichtverhältnisse ändern sich schlagartig von Hell zu Dunkel (oder umgekehrt), wodurch die CMOS-Kameras und/oder der Lidar des Fahrzeuges kurzzeitig geblendet werden. Eine FIR-Kamera hingegen ist in der Lage, die Fahrzeugumgebung kontinuierlich und deutlich zu erfassen.

Um autonomes Fahren der Stufen 3 bis 5 zu ermöglichen, wird FIR die führende Rolle im Zusammenspiel mit CMOS übernehmen

Obwohl die überlegene Bildwahrnehmung von FIR es ermöglicht, eine breite Abdeckung bei einer Vielzahl von widrigen Witterungs- und Lichtverhältnissen, und inmitten von Fußgängern oder Tieren, erfolgreich (im Vergleich zu CMOS-Sensoren) zu gewährleisten, schlagen die Befürworter dieser Technologie nicht den Ersatz aller anderen Sensoren durch FIR als einzige Wahrnehmungslösung vor. Vielmehr bekräftigen sie, dass FIR mit einer CMOS - Lösung kombiniert werden sollte, um eine umfassendere Wahrnehmungsfähigkeit zu erreichen, die zur Erreichung der vollständigen Autonomie erforderlich ist.

Beispielsweise können die beiden Sensorlösungen synergetisch zusammenarbeiten, um autonomen Fahrzeugen eine bessere Erkennung und Identifizierung von Straßenschildern zu ermöglichen. Um angemessen auf ein Verkehrsschild zu reagieren, muss ein Fahrzeug dieses zuerst erkennen, es vom Hintergrund separieren und es dann identifizieren. Allerdings können weder CMOS noch FIR beide dieser Aufgaben unabhängig voneinander ausführen. Da FIR darauf beruht, die thermische Signatur und den Emissionsgrad zu bestimmen, kann es Farben nicht sehr differenziert erkennen (d.h. es hat Mühe mit ihrer Identifizierung). Auf der anderen Seite kann CMOS thermisch homogene Bereiche nicht effektiv erkennen und sie vom Hintergrund trennen – eine Aufgabe, die FIR problemlos erledigt. Nutzt man diese beiden Sensoren in Kombination (indem

der FIR - Sensor das Verkehrszeichen klar vor dem Hintergrund erkennt und der CMOS –Teil das Zeichen identifiziert) so ermöglicht dies dem autonomen Fahrzeug, seine Umgebung bestmöglichst zu sehen und zu verstehen.



Bild 2. FIR vs. CMOS Darstellung bei Nebel



Bild 3. FIR vs. CMOS Darstellung bei Regen



Bild 4a. FIR vs. CMOS Darstellung bei Dunst



Bild 4b. FIR vs. CMOS Darstellung bei Dunst

FIR ist eine reife und erprobte Technologie

Die aggressiven Pläne der Automobilhersteller, innerhalb der nächsten fünf bis 10 Jahre vollständig autonome Fahrzeuge bereitzustellen, können mit den aktuell verwendeten Sensoren nicht verwirklicht werden. Um ihre Ziele zu erreichen und dem Massenmarkt eine sichere Level-5-Autonomie zur Verfügung zu stellen, müssen die Automobilhersteller sich der FIR - Technologie zuwenden, und es ist merkwürdig, warum viele dies noch vor sich haben.

FIR wird seit Jahrzehnten in anderen vertikalen Branchen (einschließlich Militär und Luftfahrt) eingesetzt und ist damit zu einer ausgereiften und bewährten Technologie mit nachgewiesener Skalierbarkeit für Massenmarkt - Anwendungen geworden. Während die FIR-Technologie in diesen anderen Bereichen gereift ist, wurde sie vom Automobilmarkt vernachlässigt - obwohl autonome Fahrzeuge eine genaue und zuverlässige Sensorlösung dringend benötigen. Experten gehen davon aus, dass die FIR - Technologie im Automobil - Massenmarkt bislang deshalb keinen Einzug gefunden hat, weil die Hersteller soweit die Technologie ausschließlich für das Premiumsegment in Erwägung zogen.

Nun jedoch steht FIR inmitten einer Revolution, und der neue Sensorhersteller AdaSky ist wegweisend. Um eine Massenproduktion zu bewerkstelligen und die Herausforderungen bei der Einführung zu bewältigen, hat das israelische Startup AdaSky

die hochauflösende Wärmebildkamera „Viper“ entwickelt, die FIR-Signale passiv sammelt, diese in ein VGA - Video umwandelt und darauf computerbasierte „deep-learning“ Bilderkennungs-Algorithmen anwendet, um die Umgebung zu erfassen und zu analysieren. Wärmebildkameras erfordern Objektive aus einzigartigen, im FIR- Spektralbereich durchsichtigen Materialien. Die üblichen optischen Materialien, die in der Vergangenheit für FIR verwendet wurden, wie z.B. Germanium, sind jedoch sehr teuer und daher nicht für die Massenproduktion geeignet. Jetzt jedoch machen neuere und fortschrittliche Chalcogenidgläser und Abformtechnologien Wärmekameras erschwinglich. In Verbindung mit den hochentwickelten Detektor-Produktionstechniken, die aus der Halbleiterindustrie übernommen wurden, sind nunmehr Wärmebildkameras mit deutlich verbesserter Qualität, geringerer Größe und einem erschwinglichen Preis möglich.

Darüber hinaus ist die Viper von AdaSky dahingehend einzigartig, dass sie keinen Verschluss benötigt („shutterless“), da sie AdaSky's Shutter - lose Inhomogenitätskorrektur verwendet und sie die einzige Kamera ist, die einen dezidierten IPS (Image Signal Processor) einsetzt. Darüber hinaus wird eine der kleinsten Detektor-Pitch und Wafer-Level-Packaging Technologien eingesetzt. AdaSky ist es gelungen, die Viper mit nur 26 mm Durchmesser und 44 mm Länge (mit 30.4° FOV= Field Of View) aufzubauen.



Bild 5. FIR-Kamera VIPER

Die FIR - Technologie in Kombination mit anderen Sensoren ist die einzige Sensor-Package Lösung, die in der Lage ist, die Wahrnehmungsfähigkeit und den Abdeckungsgrad zu liefern, die erforderlich sind, um die Autonomie der Stufen 3 bis 5 für den Automotive Markt zu ermöglichen.