



Jenseits des Regenbogens

Bildverarbeitung im SWIR: Potential und Herausforderung

Infrarotkameras erfassen eine Realität, die das menschliche Auge nicht sehen kann. Die Eigenschaften von Infrarotlicht eröffnen unendliche Möglichkeiten für die Industrie, die Wissenschaft oder die Sicherheitsüberwachung. Doch die InGaAs-Sensortechnologie hat ihre Grenzen und Tücken, die eine gute Kamera für den kurzwelligen Infrarotbereich überwinden muss, um die bestmögliche Bildqualität zu liefern.

„Ich glaube, was ich sehe.“ Wir Menschen verlassen uns primär auf unser Sehvermögen, um unsere Umwelt wahrzunehmen, uns eine Meinung wortwörtlich zu „bilden“ und Entscheidungen zu treffen. Dieses instinktive Vertrauen in unsere Augen bleibt immer da, obwohl wir wissen, dass unsere Wahrnehmung z. B. durch optische Illusionen getäuscht werden kann. Wichtiger noch: Wir wissen, dass das Lichtspektrum, das unser menschliches Auge wahrnehmen kann, sehr begrenzt ist: die Regenbogenfarben sind nur der sichtbare Teil des Eisbergs.

Konventionelle Bildsensoren wie CCD oder CMOS haben eine breitere spektrale Empfindlichkeit als das menschliche Auge, insbesondere im Nahinfrarotbereich. So lässt sich z. B. die Funktion einer Infrarot-Fernbedienung leicht prüfen, indem man sie

über eine Kamera betrachtet: das Infrarotsignal ist im Bild als Lichtpunkt sichtbar. Mit anderen Sensortechnologien lässt sich das Infrarotspektrum noch besser erkunden – allerdings ist es viel breiter als das sichtbare Spektrum. Deshalb wird es in der Fachwelt in Kategorien unterteilt:

- Nah-Infrarot (NIR): 0,75 bis 1 μm ,
- Kurzwellen-Infrarot (SWIR – Short-Wave Infrared): 1 bis 2,7 μm ,
- Mittelwellen-Infrarot (MWIR – Mid-Wave Infrared): 3 bis 5 μm ,
- Langwellen-Infrarot (LWIR – Long-Wave Infrared): 8 bis 14 μm ,
- Ultra-Langwellen-Infrarot (ULWIR): 14 bis 30 μm .

Diese verschiedenen Spektralbereiche erfordern unterschiedliche Sensortechnologien. Neben NIR ist SWIR die Bandbreite, die am meisten für industrielle und wissenschaftliche Applikationen verwendet wird.



Gemälde im sichtbaren Licht (l.) und im SWIR-Spektrum (r.)

Kurzwellen-Infrarot: Viele Anwendungsgebiete

Kurzwellen-Infrarotkameras ermöglichen viele Bildverarbeitungsanwendungen, indem sie ihre Bilder jenseits des sichtbaren Spektrums erfassen. Zum Beispiel können SWIR-Kameras durch einige Werkstoffe „sehen“, die für das menschliche Auge undurchsichtig sind. Diese Eigenschaft wird genutzt, um Füllmengen zu prüfen, den Wassergehalt zu ermitteln oder mit versteckten Wasserzeichen die Echtheit von Dokumenten zu kontrollieren. Mit Hilfe von Filtern, speziellen Optiken oder Lichtquellen kann man die Empfindlichkeit der Kamera auf eine bestimmte Bandbreite reduzieren, um bestimmte Eigenschaften des Prüfobjekts hervorzuheben.

Eine weit verbreitete Anwendung von Bildverarbeitung im Kurzwellen-Infrarotbereich ist die Messung von Feuchtigkeit bzw. Wassergehalt. Wasser ist im sichtbaren Spektrum durchsichtig, absorbiert aber Infrarotstrahlen, besonders zwischen 1.450 und 1.900 nm. Dadurch erscheint es im Infrarotbild schwarz. Mit entsprechendem Filter oder Beleuchtung kann dieses Phänomen für viele Prüfaufgaben benutzt werden – z. B. um den Trocknungsprozess einer Beschichtung oder eines Materials wie Holz zu kontrollieren, die Füllmenge in undurchsichtigen Behältern zu prüfen oder Druckstellen in Obst und Gemüse zu ermitteln.

Bei anderen Materialien verhält es sich umgekehrt: Der Werkstoff ist undurchsichtig im sichtbaren Bereich und durchsichtig für Infrarot. Dank dieser Eigenschaft lassen sich zerstörungsfreie Prüfungen durchführen. So kann ein Hersteller von Injektionspritzen die Anwesenheit der Nadel kontrollieren, ohne die sterile Kunststoffkappe zu entfer-

nen: Der Kunststoff ist infrarotdurchlässig, das Metall der Nadel nicht. Auch Kunsthistoriker und Restauratoren können mit SWIR-Kameras die Bleistiftskizze unterhalb der Farbschicht eines Gemäldes hervorheben. Infrarotdurchlässige Spezialtinten werden beim Druck von Geldscheinen verwendet, um ihre Echtheit zu sichern.

Auch Silizium ist im Kurzwellen-Infrarotbereich durchsichtig. Diese Eigenschaft erweist sich als sehr nützlich für die Halbleiterindustrie. Mit SWIR-Kameras lassen sich Kontaktpunkte durch den Silizium-Wafer inspizieren. SWIR-Kameras werden außerdem für spektroskopische Analysen eingesetzt – etwa um unbekannte Substanzen zu identifizieren oder die Reinheit eines Wertstoffes zu ermitteln. Zum Beispiel nutzen Recyclingunternehmen die unterschiedlichen Spektraleigenschaften von Kunststoffen, um sie automatisiert zu sortieren.

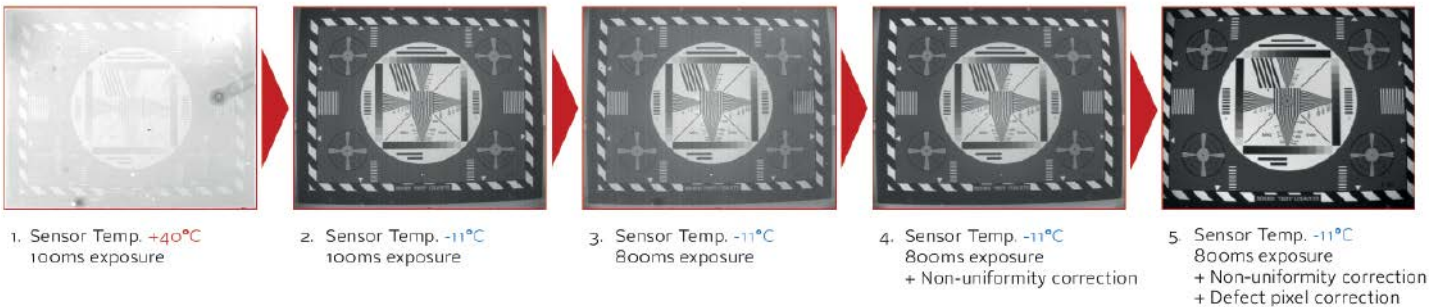
In der Mikroelektronik- und Photovoltaikindustrie wird Lumineszenz im Infrarotbereich zur Qualitätsprüfung verwendet. Elektrolumineszenz ist die Strahlung von Licht unter dem Einfluss eines elektrischen Stroms. Dadurch lassen sich Mikrorisse oder Druckfehler am Ende des Fertigungsprozesses ermitteln. Fotolumineszenz ist die Strahlung von Licht unter dem Einfluss eines anderen Lichteinfalls. Sie lässt sich leichter an verschiedenen Stufen des Fertigungsprozesses einsetzen. Das vom Silizium ausgestrahlte Licht hat seine stärkste Intensität bei ca. 1.150 nm. Diese Strahlung wird am besten von SWIR-Kameras mit InGaAs-Sensor erfasst.

Herausforderung Bildqualität: Grenzen der InGaAs-Technik

Bildverarbeitung im SWIR-Bereich eröffnet viele Möglichkeiten jenseits des Sichtbaren

für die unterschiedlichsten Anwendungsgebiete. Dennoch kann dieses Potential nur dann ausgeschöpft werden, wenn die Bildqualität eine präzise Analyse durch Mensch oder Software erlaubt. Hier liegt die technische Herausforderung in der Konstruktion von InGaAs-Sensoren. Sensoren für SWIR-Kameras funktionieren nach dem gleichen Prinzip wie CCD- oder CMOS-Chips: Sie wandeln Photonen in Elektronen um. Um das Infrarotlicht zu erfassen, muss ihre fotosensitive Oberfläche aus einem anderen Material bestehen als Silizium, denn Silizium lässt Infrarotstrahlen durch. Die verwendeten Materialien sind Indium-Gallium-Arsenide (InGaAs) oder Quecksilber-Cadmium-Tellurid (HgCdTe oder MCT – Mercury Cadmium Telluride). Diese Sensoren entwickeln ein starkes Rauschen bei steigender Temperatur und müssen gekühlt werden, um dieses Phänomen zu unterdrücken. Im Unterschied zu MCT benötigen InGaAs-Sensoren keine aufwändige kryogenische Kühlung. Deshalb sind sie preiswerter, praktischer und beliebter.

Die fotosensitive InGaAs-Oberfläche wird im InGaAs-Sensor mit einem CMOS-Auslesechip kombiniert. Jedes Pixel des InGaAs-Rasters ist mit dem entsprechenden Pixel des Auslesechips verbunden. Diese „Sandwich“-Architektur macht die Herstellung von InGaAs-Sensoren komplex und aufwändig. Dementsprechend sind InGaAs-Sensoren teurer als CCD- oder CMOS-Sensoren. Leider hat diese hybride Architektur einen weiteren Nachteil: Mit dem heutigen Stand der Technik ist es nicht möglich, die empfindliche InGaAs-Oberfläche mit hundertprozentiger Passgenauigkeit mit dem Auslesechip zu verbinden. Das Ergebnis ist, dass InGaAs-Sensoren verglichen mit CCD oder CMOS



Die Bildoptimierung in der SWIR-Kamera ist entscheidend.

einen höheren Anteil an defekten Pixeln ($< 1\%$). Zudem hat jedes Pixel ein etwas anderes Verhalten als die anderen. Das rohe Bild, wie es vom Sensor geliefert wird, ist deshalb rauschanfällig und hat Streifenartefakte sowie mehrere zu dunkle oder zu helle Pixel. Zum Glück wird nicht dieses Bild von der Infrarotkamera an den Host PC übertragen. Kamerahersteller setzen verschiedene Korrekturtechniken um, um die Bildqualität bereits in der Kamera zu optimieren. In Allied Visions Goldeye SWIR-Kameramodellen etwa sieht der Optimierungsprozess wie folgt aus:

- Zunächst wird der Sensor gekühlt. Die Kamera ist mit einem eingebauten System zur Überwachung der Sensortemperatur sowie einem thermoelektrischen Kühlmodul ausgestattet (TEC 1). So wird sichergestellt, dass die Sensortemperatur auf einem niedrigen Niveau gehalten

„Der Nutzer einer SWIR-Kamera sollte sich der Grenzen der InGaAs-Technologie bewusst sein.“

wird. Das Ergebnis sind rauscharme Bilder, auch bei längeren Belichtungszeiten.

- Neben der Sensorkühlung findet in der Kamera eine Bildoptimierung statt, die die InGaAs-typischen Fehler korrigiert: Die sogenannte Non-Uniformity Correction (NUC) gleicht die ungleichmäßige Empfindlichkeit der einzelnen Pixel aus, um ein homogenes Bild zu erstellen. Die Defect Pixel Correction ersetzt fehlerhafte

Pixel durch einen Mittelwert der benachbarten Pixel.

Das Ergebnis ist eine Bildqualität, die mit dem Rohbild eines ungekühlten Sensors nicht zu vergleichen ist, und sowohl von Menschen als auch von Maschinen viel besser und genauer interpretiert werden kann.

Bildoptimierung ist entscheidend

Bildverarbeitung im Kurzwellen-Infrarotbereich eröffnet viele neue Möglichkeiten in den unterschiedlichsten Anwendungsgebieten. Doch sollte der Nutzer einer SWIR-Kamera sich der Grenzen der InGaAs-Technologie bewusst sein. Diese gelten für alle Kamerahersteller. Die tatsächliche Bildqualität einer InGaAs-Kamera hängt maßgeblich davon ab, wie gut die Kamera die vom Sensor gelieferten Bilder korrigiert und optimiert.

Goldeye SWIR-Kamera von Allied Vision



Autor
Jens Hashagen, Produktmanager

Kontakt
Allied Vision Technologies GmbH, Stadtroda
Tel.: +49 36428 677 0
info@alliedvision.com
www.alliedvision.com