

► Zeile für Zeile Qualität - Eine Einführung in die Arbeitsweise von Zeilenkameras

Wenn Stahlbänder, Papierbahnen oder sonstige Endlosmaterialien bei ihrer Herstellung mit rasanten Geschwindigkeiten auf Fehler geprüft werden sollen, stellen Bildverarbeitungs-Systeme auf der Basis von Zeilenkameras oft die einzige technisch und wirtschaftlich realisierbare Lösung dar.

Für Aufgabenstellungen, bei denen bewegtes Bandmaterial auf Fehler inspiziert werden soll, stellen Zeilenkameras meist die bessere Alternative im Vergleich zu herkömmlichen Matrixkameras dar. Der Einsatz von Zeilenkameras stößt jedoch immer wieder auf Vorbehalte, die wohl vor allem auf mangelnde Erfahrung mit dieser Methode zurückzuführen sind. Dies führt dazu, dass Bildverarbeitungs-Anwender in ihren Applikationen häufig selbst dann die gewohnte Flächenkamera-Technik nutzen, wenn der Einsatz von Zeilenkameras für diese Applikation technologisch sinnvoller wäre. Dabei bieten gerade Zeilenkameras einen kostengünstigen Weg, hochauflösende Bilder zu erzeugen und diese der Software zur Auswertung auf den immer schneller werdenden Standard-PC-Plattformen zur Verfügung zu stellen.



Bild 1: Kompaktes Kamera-Design: Die DALSA Spyder2

► Die Funktionsweise von Zeilenkameras

Klassische Anwendungsgebiete für Zeilenkameras sind Applikationen, in denen »Bahnware« analysiert werden soll (siehe Bild 2). Der Grund, warum sich Zeilenkameras für diese meist im Endlos-Verfahren ablaufenden Prozesse besser eignen als Matrix-Kameras, ist prinzipiell im unterschiedlichen Aufbau dieser beiden Technologien zu sehen:

Flächenkameras liefern je nach Kameratyp eine feste (synchrone) oder variable (asynchrone) Bildfolge eines bewegten Objektes. Für eine lückenlose Erfassung von Endlos-Objekten erfolgt die Bildaufnahme in der Praxis mit einer Überlappung der Bilder. Anschließend müssen die Einzelbilder per Software aufwändig zugeschnitten, von Verzerrungen befreit und aneinander gereiht werden.

Zeilenkameras besitzen hingegen nur eine einzige Reihe lichtempfindlicher Bildelemente, die bewegte Objekte kontinuierlich mit hoher Zeilenfrequenz abtastet. Nach heutigem Stand der Technik bewegen sich die Auflösungen von Zeilenkameras typischerweise zwischen 512 und 12.888 Pixeln. Marktüblich sind dabei Sensoren mit Pixel-Kantenlängen von 7 µm, 10 µm und 14 µm. Bei sehr hohen Auflösungen wird mit Rücksicht auf das später zu verwendende Objektiv beim Design des Sensors mit kleineren Pixeln gearbeitet, da z.B. ein Sensor mit 8.000 Pixeln und 10 µm Kantenlänge nur noch von einem Objektiv mit mindestens 8 cm Bildkreisdurchmesser verzerrungsfrei »ausgeleuchtet« werden könnte.

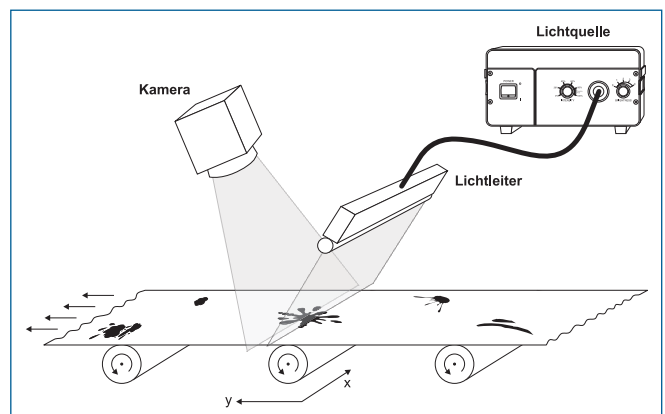


Bild 2: Schematischer Aufbau einer Zeilenkamera-Applikation mit angedeuteten Fehlerstellen

Im Betrieb werden die Ladungen der einzelnen Pixel in ein parallel angeordnetes, horizontales Register ausgelesen (Bild 3) und Pixel für Pixel in digitale Werte umgewandelt, die dann vom PC gespeichert und weiterverarbeitet werden können. Zur Verdeutlichung: Würde eine Zeilenkamera auf ein stehendes Objekt blicken und z.B. mit einer konstanten Zeilenfrequenz von 1 kHz betrieben werden, so wären 1.000 Zeilen eines PC-Monitors innerhalb von 1 Sekunde mit den zeilenweise jeweils gleichen Grauwert-Informationen gefüllt.

► Auf die richtige Einstellung kommt es an

Dieses Beispiel macht klar, dass ein 2D-Abbild eines flächigen Objektes bei der Aufnahme mit einer Zeilenkamera nur dann entstehen kann, wenn sich dieses mit einer sinnvollen Geschwindigkeit unter der Kamera hinweg bewegt. Natürlich könnte auch die Kamera über das Objekt geführt werden - in manchen Applikationen ist dies sogar durchaus sinnvoll.

Um bei einem bewegten Objekt in Richtung der Bewegung (Y-Richtung) die gleiche Auflösung zu erzielen wie in Richtung der Objektbreite (X-Richtung), muss die Zeilenfrequenz der Kamera mit der Geschwindigkeit des Objektes gekoppelt sein. Ist dies nicht der Fall, so entsteht bei fest eingestellter Zeilenfrequenz und variabler Objektgeschwindigkeit eine Streckung oder Stauchung des Objektbildes am Monitor oder im Bildspeicher. Da die Geschwindigkeit von Transportbändern oder Verfahrenseinrichtungen in der Praxis jedoch meist Lastwechseln oder Brems- und Beschleunigungsvorgängen unterworfen sind und somit selten exakt gleichmäßig laufen, kann in der Regel nicht mit fester Zeilenfrequenz gearbeitet werden.

Die verwendete Hardware muss also einen Weg zulassen, die Zeilenfrequenz an die momentane Geschwindigkeit des Prüfmaterials anzupassen, denn nur dann ist die flächige Auswertung des Bildes mit Software-Algorithmen sinnvoll und genau.

In der Praxis wird dies meist über einen Inkrementalgeber realisiert, der mit der Antriebseinheit gekoppelt ist. Diese Rückmeldung sollte natürlich von einer Stelle aus erfolgen, an der der kleinste

Schlupf bezogen auf das Objekt zu erwarten ist. Diese Frage ist von Fall zu Fall zu untersuchen. Die Pulse des Gebers werden dann der Bilderfassungskarte zugeführt und über einstellbare Frequenzteiler für die gewünschte Auflösung in Laufrichtung konditioniert, bevor diese zur Auslösung der Belichtung an die Zeilenkamera weitergeleitet werden.

Somit wäre die erste Hürde genommen, um die Auflösung bei wechselnden Geschwindigkeiten konstant zu halten. Dies ist aber leider nur die halbe Miete, denn nun ist zwar die Zeilenfrequenz mit der Geschwindigkeit »hart« gekoppelt, doch der Monitor würde nun je nach Geschwindigkeit ein Bild mit unterschiedlicher Helligkeit anzeigen. Der Grund dafür liegt in den variierenden Belichtungszeiten des Zeilensensors bei wechselnder Zeilenfrequenz. Die Belichtungszeit in dieser »Basisbetriebsart« ist grob der Kehrwert der Zeilenfrequenz oder der Abstand zweier Auslösepulse.

Mit Hilfe entsprechender Timing-Signale wird die Integrationszeit des Sensors konstant gehalten. Die Einstellung erfolgt am Bilderfassungs-Board und richtet sich nach der maximal zu erwartenden Zeilenfrequenz. Beträgt diese z.B. 10.000 Hz, so muss die Integrationszeit auf einen Wert eingestellt werden, der kürzer als 1/10.000 s ist. Damit ist der Idealzustand erreicht: Das Bild ist auch bei wechselnden Zeilenfrequenzen immer konstant belichtet und behält seine Auflösung bei. Das Steuersignal zur Zeilenkamera beinhaltet nun die Information über aktuelle Zeilenfrequenz und Belichtungszeit und ist bei modernen Konzepten eine Mischung aus Pulsfolge und Pulslänge.

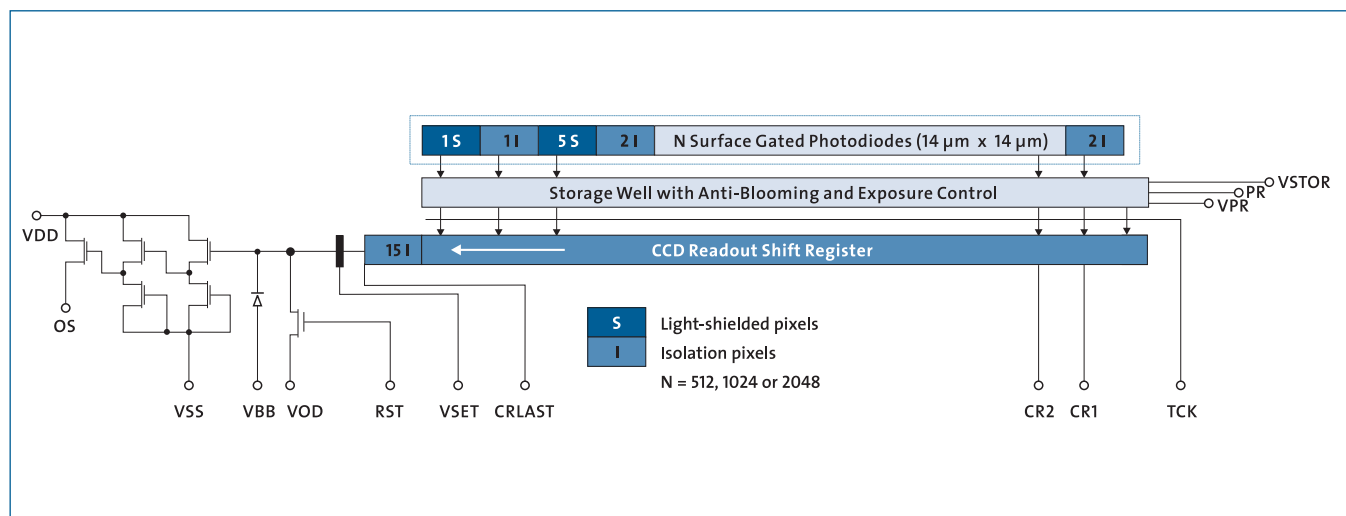


Bild 3: Sensor-Aufbau der Zeilenkamera-Serie Spyder2 von DALSA

► Schnell und empfindlich

Die Unterschiede in den technischen Merkmalen von Zeilenkameras sind enorm. So existieren Modelle, die besonders in Bezug auf hohe Geschwindigkeit und Empfindlichkeit optimiert wurden. Ein Beispiel hierfür ist die Zeilenkamera Spyder3 des kanadischen Herstellers DALSA, die in den Varianten mit 1024 und 2048 Pixeln mit Datenraten von bis zu 80 MHz erhältlich ist. Mit $(14 \times 14) \mu\text{m}^2$ Pixelgröße und einer zweiten zuschaltbaren Zeile eignet sich dieses Modell auch für lichtschwache Anwendungen.

Das in puncto Empfindlichkeit leistungsfähigste Prinzip ist unter dem Namen TDI (Time Delay and Integration) bekannt und wurde von DALSA zur Perfektion gebracht. Bei dieser ausgeklügelten Sensortechnik wird eine Zeileninformation in einem Sensor mit mehreren Zeilen synchron zur Objektbewegung kopiert und wieder mit der gleichen Bildinformation belichtet. So wird eine um den Faktor 100 gesteigerte Empfindlichkeit gegenüber Standardvarianten erreicht.

Bei heutiger Sensor- und A/D-Wandlertechnik sind Pixelclock-Frequenzen von 80 MHz für 12 Bit-Signale kein Thema mehr und ermöglichen z.B. bei 1024 Pixeln Zeilenfrequenzen von weit über 50 kHz. Hinsichtlich Geschwindigkeit muss der Anwender von Zeilenkameras jedoch damit leben, dass die Datenrate bzw. Pixelclock-Frequenz eines (CCD-)Sensors begrenzt ist. Dadurch hat auch die maximale Zeilenfrequenz bezogen auf die Sensorauflösung physikalische Grenzen, die jedoch durch Arbeitsteilung umgangen werden können: Bei leistungsfähigen Zeilenkameras lässt sich der Sensor in mehrere Bereiche aufteilen, die dann parallel mit voller Geschwindigkeit ausgelesen werden können. So wird der Sensor der Hochleistungs-Zeilenkamera DALSA Piranha3 mit 8192 Pixel über 8 Kanäle mit je 40 MHz ausgelesen. Auf diese Weise ist eine Zeilenfrequenz von bis zu 33,7 kHz realisierbar! (siehe Bild 4). In



Bild 4: Die Hochleistungs-Zeilenkamera Piranha3 von DALSA erlaubt das Auslesen von 8192 Pixeln über acht Kanäle mit je 40 MHz

Anwendungsfällen, bei denen selbst eine hochauflösende Kamera nicht ausreicht, werden oft zwei oder mehr Kameras in einer Linie installiert, da mehrere Zeilenkameras mit der halben Auflösung wesentlich schneller ausgelesen werden können.

Um die Genauigkeiten von Zeilenkameras weiter voranzutreiben, lassen sich die Hersteller immer neue intelligente Lösungen einfallen. So stellt z.B. die Firma DALSA mit einem speziell entwickelten Verfahren sicher, dass die Sensoren ihrer Kameras optimal und stets exakt gleich in die Kamera eingebracht werden. Damit vereinfacht der Hersteller vor allem den Ersatz oder das Neueinrichten von Kameras. Zudem verringern sich für den Anwender die Wartungskosten.

Ein praktisches Beispiel zur Ermittlung von Zeilenfrequenz und Belichtungszeit

Bekannt seien:

- Objektbreite: $B = 370 \text{ mm}$
- Objektgeschwindigkeit: $v = 3 \text{ m/s}$
- Geforderte Auflösung: $Dx = 0,2 \text{ mm / Bildpunkt}$

Die benötigte Anzahl der Bildpunkte errechnet sich damit zu

$$n \text{ Pixel} = B / Dx$$

Somit ist eine Auflösung von mindestens 1850 Pixeln erforderlich. In der Praxis sind Modelle mit 2048 Pixel erhältlich. Wird nun die Objektbreite von 370 mm auf die 2k-Zeile abgebildet, so erfasst

ein Pixel 0,18 mm im Objekt. Sollen horizontale und vertikale Auflösung gleich sein (Ratio 1:1), so lässt sich die Zeilenfrequenz folgendermaßen berechnen:

$$fz = v / Dy$$

Wegen der berechneten Auflösung $Dx = Dy$ mit $Dx = 0,18 \text{ mm}$ ergibt sich:

$$fz = 16.667 \text{ Hz}$$

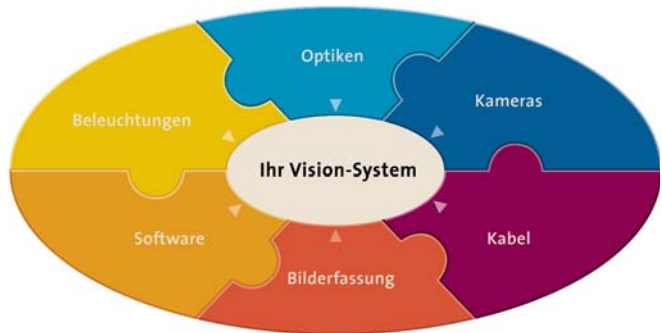
Die Zeilenkamera sollte demnach für eine Zeilenfrequenz von mind. 16,7 kHz ausgelegt sein.



► Einfache Konfiguration

Die Vielfalt der Anwendungen für Zeilenkameras verlangt eine flexible Konfiguration der Kamera. Stand der Technik ist heute z.B. die variable Einstellung der Datenausgabe: So kann der Anwender üblicherweise die Datentiefe auf 8, 10 oder 12 Bit einstellen und eine Datenausgabe über bis zu acht Kanäle sowie die Datenrate wählen. Weiterhin lassen sich Korrektur-Tabellen (z.B. Flat-Field-Korrektur) in die Kamera hochladen. Auch der Betriebsmodus kann zwischen freilaufend und Trigger-Modus gewechselt werden.

Die hier bisher beschriebenen Techniken beziehen sich auf monochrome Zeilenkameras, die den größten Anteil der eingesetzten Zeilenkameras ausmachen. Es existieren jedoch auch Zeilenkamera-Modelle für Farbanwendungen und die Farberkennung. In diesem Segment haben sich drei verschiedene Systeme etabliert. So gibt es hochpräzise 3-CCD-Kameras, bei denen der Strahlengang durch ein Prisma auf drei Sensoren aufgeteilt wird. Nicht viel weniger präzise



sind Tri-lineare Kameras. Bei diesem Kamera-Typ erfassen drei dicht angeordnete RGB-Zeilen das bewegte Objekt. Die interne Kamera-Elektronik gleicht den entstehenden Zeilen-Versatz aus. Als kostengünstige Alternative stehen zudem Monoline-Farbzeilenkameras mit RGB-Filter-Triple-kodierten Pixeln zur Verfügung.

► Die Kombination macht's

Selbst die beste Zeilenkamera ist jedoch für sich alleine nicht in der Lage, eine Inspektions-Aufgabe in der industriellen Fertigung qualitativ hochwertig und effektiv zu lösen. Für die Qualität der gesamten Bildaufnahme ist vielmehr das richtige Zusammenspiel der einzelnen Komponenten, von der Beleuchtung über Optik und Kamera bis hin zur Bilderfassungs-Hardware entscheidend. Von ebenso zentraler Bedeutung ist die Leistungsfähigkeit der nachgeschalteten Bildverarbeitungs-Software, welche die Auswertung der angelieferten Daten übernimmt.

Für jedes Glied dieser Kette existiert eine große Auswahl an grundlegend verschiedenen Techniken und Produkten, die ein harmonisches Zusammenspiel ermöglichen. Die Kombination einer geeigneten Zeilenkamera mit der richtigen Bilderfassungs-Hardware ist zwar aufgrund gemeinsamer Standards heute kein großes Problem mehr. Um jedoch die einzelnen Elemente einer auf die Anforderungen der jeweiligen Applikation optimierten Gesamtlösung auszuwählen, empfiehlt sich eine intensive Beratung von Experten.

Fazit

Zeilenkameras bieten für bestimmte Anwendungen, vor allem bei der Inspektion von Bandmaterial, eine wirtschaftliche und technisch äußerst leistungsfähige Möglichkeit der Qualitätsüberwachung. STEMMER IMAGING hilft Ihnen gerne bei der Auswahl der geeigneten Komponenten für Ihre Zeilenkamera-Anwendung!

