

Zeilenkameras für die industrielle Bildverarbeitung

Praktischer Einsatz in Industrie und Forschung

Zeilenkameras sind Halbleiterkameras mit nur einer lichtempfindlichen Zeile. Sie finden ihre Verwendung vor allem im industriellen Umfeld. Eingesetzt werden Zeilenkameras entweder zur Ermittlung eindimensionaler Messgrößen, wie z.B. der Breite eines Spaltes, oder in Verbindung mit einer scannenden Bewegung zur Aufnahme eines zweidimensionalen Bildes, wie z. B. bei einem Faxgerät oder Kopierer. Vorzüge der Zeilenkameras sind hohe optische Auflösung, hohe Geschwindigkeit, freie Dimensionierung der Bildhöhe und Synchronisierbarkeit jeder einzelnen Zeile. Sie eröffnen vielfältige Einsatzmöglichkeiten in der industriellen Bildverarbeitung. Bei Bahnmaterialien, Förderbändern oder ähnlichem, bieten Zeilenkameras zudem die Möglichkeit kontinuierlicher Endlosaufnahmen. Zur Rechneranbindung stehen dem Anwender moderne digitale Schnittstellen wie Gigabit Ethernet, USB 2.0 (demnächst 3.0), CameraLink und LVDS zur Auswahl.

In der industriellen Bildverarbeitung ist eine qualitativ hochwertige Bildaufnahme die Voraussetzung für die automatische Bildauswertung. Erst bei einer scharfen, kontrastreichen und detaillierten Abbildung des Prüfobjekts führt die Anwendung von Bildverarbeitungsalgorithmen zum Ziel. Die hohe Bildqualität wird durch die Kombination aus Zeilenkamera, hochauflösendem Objektiv, geeigneter Beleuchtungstechnik und einer präzisen Motoreinheit (Rotations- oder Linearantrieb, Förderband etc.) erreicht.

Das Bild einer Zeilenkamera ist das Helligkeitsprofil des Prüfobjekts entlang des Zeilensensors. Eine zweidimensionale Abbildung entsteht durch scannende Bewegung des Prüfobjekts unter der Kamera. Während der Bewegung werden die einzelnen Zeilensignale nach der Übertragung über die Schnittstelle im Rechner Stück für Stück zu einem 2D-Bild zusammengesetzt. Für eine proportional richtige Abbildung müssen die

DIE AUTOREN

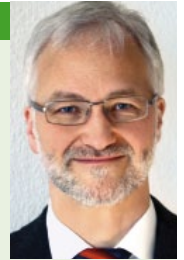
PETER GIPS

Dipl.-Ing. Peter Gips studierte Informationstechnik an der Technischen Universität Dresden. Nach Forschungstätigkeiten im Bereich digitale Signalverarbeitung an der Akademie der Wissenschaften in Berlin kam er im Jahr 1991 zu Schäfter+Kirchhoff. Er ist dort verantwortlich für die Bereiche digitale Bildverarbeitung und Softwareentwicklung.



ULRICH OECHSNER

Dr. Ulrich Oechsner schloss sein Studium der Physik an der Universität Hamburg mit der Promotion ab. Nach Forschungstätigkeiten im Bereich Elektrophysiologie und physiologische Optik kam er im Jahr 2000 zu Schäfter+Kirchhoff. Er ist dort verantwortlich für die Bereiche Optik- und Systementwicklung.



Schäfter+Kirchhoff GmbH
Kieler Str. 212
D-22525 Hamburg
Tel.: +49 (0)40 85 39 97-0
Fax: +49 (0)40 85 39 97-79
E-Mail: info@SuKHamburg.de
Website: www.SuKHamburg.com

Transportgeschwindigkeit und die Kameraaufnahme exakt synchronisiert werden. Dies kann durch die Anpassung der Transportgeschwindigkeit an die Zeilenfrequenz der Kamera erfolgen. In der Praxis sind jedoch häufiger die Transportgeschwindigkeit und die Bildauflösung vorgegeben und die erforderliche Zeilenrate wird zum Auswahlkriterium für die Kamera.

Bei konstanter Transportgeschwindigkeit, z. B. bei der Untersuchung von Objekten auf Förderbändern, können Zeilenkameras im Freilauf betrieben werden. Bei Geschwindigkeitsschwankungen, Anfah- und Abbremsrampen während der Aufnahme ist die äquidistante Triggerung der Zeilenkamera z. B. durch einen Inkrementalgeber der Motorsteuereinheit erforderlich. Die exakte Synchronisation von Transportgeschwindigkeit und Kameraaufnahme garantiert das richtige Seitenverhältnis und eine reproduzierbare Auflösung im Bild (siehe Abbildung 1). Bei vorgegebener Objektgeschwindigkeit v_0 und Bildfeldbreite FOV errechnet sich die Zeilenfrequenz f_L unter

Berücksichtigung der Pixelbreite w und Sensorlänge S nach

$$f_L = \frac{v_0 \cdot S}{w \cdot FOV} \quad (1)$$

Optische Auflösung

Die native optische Auflösung einer Zeilenkamera ist definiert durch die Anzahl der Pixel (Picture Elements), der lichtempfindlichen Elemente in der Zeile. Verfügbar sind Zeilenkameras mit bis zu 12000 Pixeln. Das Auflösungsvermögen des Scannersystems wird darüber hinaus durch das Objektiv und den Abbildungsmaßstab β' bestimmt, dem Verhältnis von Bildgröße zur Objektgröße.

$$\beta' = -\frac{S}{FOV} \quad (2)$$

$$p' = \frac{w}{-\beta'} \quad (3)$$

Für eine Abbildung im richtigen Seitenverhältnis muss die Bildpunktauflösung p' (3)

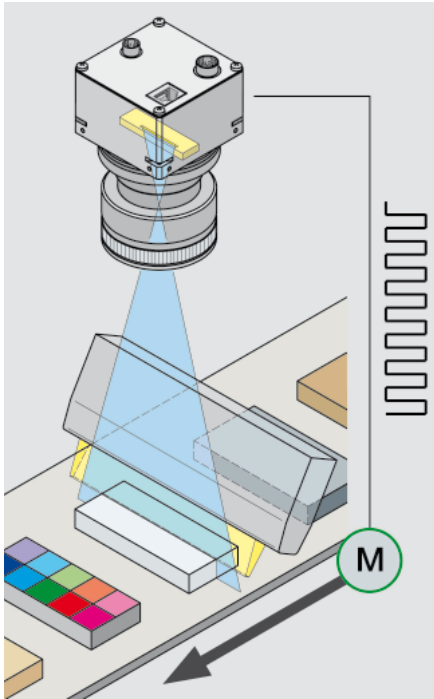


ABB. 1: Die Erfassung eines 2D-Bildes mit der Zeilenkamera erfordert die Synchronisation der Kameraaufnahme mit der Transportgeschwindigkeit des Objekts.

in Sensorachse (X) auch in Transportrichtung senkrecht zum Sensor (Y) eingehalten werden. Die Auflösung in Transportrichtung wird über die Transportgeschwindigkeit und Zeilenfrequenz der Kamera gesteuert, siehe Gleichung (1).

Die gleiche Auflösung in X- und in Y-Richtung ist Voraussetzung für die Messung geometrischer Merkmale auf der Oberfläche des Prüfbjektivs.

Die optische Auflösung des Scannersystems wird in oft auch in Bildpunkte pro Längeneinheit angegeben, z.B. dpi (dot per inch).

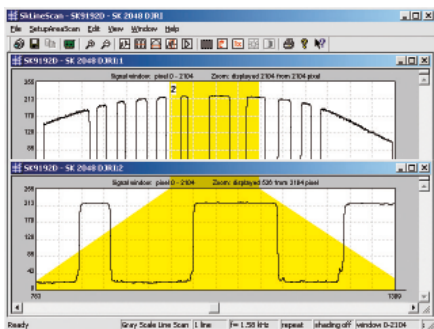


ABB. 3: Die oszilloskopische Signaldarstellung im SkLineScan-Programm ist ein ideales Werkzeug für die Einstellung der Kamera und des Objektivs.



ABB. 2: Zeilenkameras für Industrie und Forschung. 512 – 12000 Pixel, monochrom und Farbe, modulares Schnittstellenkonzept.

Belichtung und Integrationszeit

Die lichtempfindlichen Elemente des Sensors wandeln das einfallende Licht in elektrische Ladungen um. Die Dauer der Ladungsträgerakkumulation wird als Integrationszeit bezeichnet. Die aufsummierten Ladungen werden pixelweise über ein Schieberegister aus dem Sensor herausgeschoben. Die Dauer des gesamten Vorgangs der Ladungsträgerakkumulation und des Auslesens ist die Belichtungsperiode.

Pixel- und Zeilenfrequenz

Die Pixelfrequenz ist die Geschwindigkeit, mit der die Ladungen aus dem Schieberegister des Sensors herausgeschoben werden. Die Höhe der Pixelfrequenz hat eine sensorabhängige Grenze. Ihr Maximum bestimmt zusammen mit der Pixelanzahl (zuzüglich einer sensorabhängigen Anzahl passiver Pixel) die für den Abtransport der Ladungen benötigte Mindestzeit – die minimale Belichtungsperiode. Schneller kann die jeweilige Zeilenkamera nicht arbeiten.

Aus dem Reziprokwert der minimalen Belichtungsperiode folgt die maximale Zeilenfrequenz. Kameras mit Integration-Control-Funktion können die Integrationszeit innerhalb einer Belichtungsperiode verkürzen (ähnlich einem integrierten Shutter).

Schnittstellen für digitale Zeilenkameras

Digitale Zeilenkameras wandeln die Spannungswerte der belichteten Zeile bereits in der Kamera zu einem digitalen Signal um. Die Auflösungstiefe beträgt dabei 8, 10 oder 12 Bit. Der digitale Datenstrom wird über die Schnittstelle in den Rechner übertragen und dort verarbeitet.

GigE Vision™ ist der jüngste Schnittstellenstandard für industrielle Bildverarbeitung. Die GigE-Zeilenkameras arbeiten mit Standard-Netzwerkkomponenten (Gigabit Ethernet) und benötigen keinen zusätzlichen Grabber. Kabellängen bis zu 100m sind möglich. Mit einer neuen Technologie und ausgewählten Sensoren hat Schäfter+Kirchhoff Zeilenkameras entwickelt, die über die Gigabit Ethernet Schnittstelle 120 MHz Pixelfrequenz erreichen. Durch die daraus resultieren hohen Zeilenraten erschließen sich neue Anwendungsmöglichkeiten für GigE-Zeilenkameras in Industrie und Forschung. Zur neuen Generation gehören je eine monochrome, Farb- und TDI-Zeilenkamera (Abb. 2).

Zeilenkameras mit CameraLink®-Interface benötigen einen zusätzlichen Grabber im PC. Sie fügen sich nahtlos in Projekte ein, bei denen CameraLink®-Grabber bereits vorhanden sind.

Die Kameras mit USB-Interface sind für mobile Anwendungen oder Anwendungen mit wechselndem Messrechner prädestiniert, z.B. mobile Messgeräte oder Versuchsaufbauten, die von einem Notebook aus bedient werden.

Software

Das Betriebsprogramm SkLineScan ermöglicht die sofortige Inbetriebnahme des Zeilenkamerasystems. Die oszilloskopische Darstellung des Zeilenkamerasignals bildet das Helligkeitsprofil über die Sensorzeile mit hoher Wiederholfrequenz ab und ist damit ein optimales Werkzeug für die Einstellung der Zeilenkamera und des Objektivs (Abb. 3).

Mit dem Programm SkLineScan können sämtliche Aufnahmeparameter eingestellt, und ihr Einfluss auf das Kamerasignal sofort beurteilt werden. Die Aufnahme zweidimensionaler Bilder ist im Freilauf oder extern synchronisiert möglich. Für die Programmierung der Zeilenkameras und für die Entwicklung von Anwenderprogrammen liefert Schäfter+Kirchhoff SDKs für Zeilenkameras mit GigE-, USB 2.0- und LVDS-Interface. Die SDKs enthalten Klassenbibliotheken für C++ sowie API-DLLs. Die mitgelieferten Beispielprogramme in C/C++ können Vorlage für die Entwicklung eigener Applikationen sein. Quellenkom-

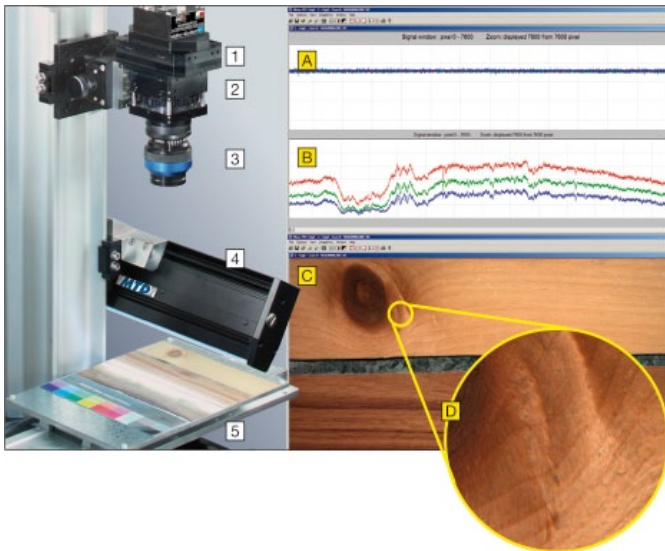


ABB. 4: Holzoberflächeninspektion mit der SK22800GJRC-XC: (A) Zeilensignal nach Weißabgleich, RGB gleiche Signalintensität; (B) Zeilensignal der braunen Holzoberfläche (geringer Blauanteil); (C) Area Scan von Holzproben; (D) Zoom-Ausschnitt von (C); (1) Zeilenkamera SK22800GJRC-XC; (2) Modular-Fokus-Adapter FA26-S55; (3) Objektiv inspec.x L5.6/105 β -0.33; (4) LED Linienlicht MTD LED CP 300; (5) Translationseinheit SK8030-21-J



ABB. 5: Der Core-Plug-Scanner, ein mobiles zeilenkamerabasiertes Bilderfassungssystem, wurde für die Inspektion von geologischen Prüfkörpern entwickelt. Mit dem robusten Gerät erfolgt die Datenerfassung direkt am Ort der Probebohrungen.

► DIE FIRMA

Schäfter+Kirchhoff

Hamburg

Schäfter+Kirchhoff wurde vor rund 50 Jahren als Ingenieurbüro für Optik-Entwicklung gegründet. Während anfänglich die Berechnung hochwertiger optischer Systeme im Vordergrund stand, hat sich der Schwerpunkt der Firma im Laufe der Jahre in Richtung Optosensorik, Lasermesstechnik und Faseroptik verschoben. Heute ist Schäfter+Kirchhoff in allen drei Bereichen mit eigenen Produktlinien und kundenspezifischen Lösungen aktiv.

Im Bereich Optosensorik stehen vor allem Zeilenkameras und Zeilenkamerasysteme im Vordergrund, häufig kombiniert mit einer an die jeweilige Messaufgabe angepassten Beleuchtungs- und Aufnahmetechnik. Die Entwicklung und die Produktion finden am Firmenstandort in Hamburg statt, von wo aus auch der weltweite Vertrieb durchgeführt wird.

www.SuKHamburg.com

mentare und das Handbuch erleichtern die Programmierung der Kameras.

Für die Entwicklung von Anwenderprogrammen für Zeilenkameras mit Camera-Link-Interface ist das SDK des Grabber-Herstellers zu nutzen.

Farbzeilenkameras

Die Sensoren von Farbzeilenkameras erfassen Rot-, Grün- und Blauanteile (RGB) in farbempfindlichen Pixeln. Sogenannte Triple-Line-Sensoren besitzen dabei drei getrennte Sensorzeilen für die Grundfarben und erreichen bei bis zu 3×7600 Pixeln eine besonders hohe Auflösung. Eine Grundvoraussetzung für diese hohe Auflösung ist eine präzise Zeilen-Synchronisation zwischen den verschiedenen Farben sowie eine seitenrichtige Pixelzuordnung. Werden diese Bedingungen nicht eingehalten, entstehen Farbkonvergenzfehler. Die Pixelbreite einer Zeilenkamera beträgt je nach Sensor $4 \mu\text{m}$ bis $14 \mu\text{m}$. Zwischen den einzelnen Farbsensorzeilen ist der Abstand (line-spacing) im Allgemeinen wesentlich höher und kann das 9-fache der Pixelgröße erreichen. Wenn die Geschwindigkeit des Prüfobjekts unbekannt ist, entsteht bei Farbzeilenkameras mit großem Line-spacing ein Farbkonvergenzfehler, da die unterschiedlichen Farbzeilen zu unterschiedlichen Zeiten ausgelesen werden.

Im Gegensatz dazu hat der Sensor der Zeilenkamera SK22800GJRC-XC (3×7600 Pixel) ein Line-spacing von $9.3 \mu\text{m}$ bei einer Pixelgröße von $9.3 \mu\text{m}$ Pixelabstand, der Abstand beträgt also nur eine Pixelhöhe. Bei zeilensynchronem Auslesen werden so Farbkonvergenzfehler minimiert, auch wenn es sich um frei bewegte Objekte handelt und die Geschwindigkeit des Messobjekts nicht zu kontrollieren ist. Zeilenkameras mit dieser Sensorart finden deshalb außerdem Einsatz bei der Kontrolle von Schüttgut oder als Zielkamera bei Sportwettbewerben.

Die neue Farbzeilenkamera SK22800GJRC-XC zeichnet sich außerdem durch eine sehr hohe Pixelfrequenz von 120 MHz aus. Damit gehört die Kamera mit zu den schnellsten GigE-Zeilenkameras weltweit. Mit einer Zeilenfrequenz von 4.9 kHz ist diese Kamera das ideale Werkzeug für hochauflösende Oberflächeninspektionen zum Beispiel in der Holz- und Druckindustrie. In Verbindung mit hochauflösenden Objektiven ist diese Farbzeilenkamera auch für den Einsatz in der Mikroskopie geeignet.

Lange Farbzeilenkamera für die Holz- und Druckindustrie – ein Anwendungsbeispiel

INFO

Kriterien für die Auswahl der richtigen Zeilenkamera

- Die Pixelanzahl und die Pixelgröße bestimmen die native Auflösung der Zeilenkamera. Je mehr und je kleiner die Pixel desto höher die Auflösung. Die Abbildung mit einer hohen Auflösung setzt jedoch ein geeignetes Objektiv voraus. Strukturen, die durch das Objektiv nicht übertragen werden können, kann die Kamera nicht abbilden.
- Die Zeilenfrequenz einer Kamera bestimmt zusammen mit dem Abbildungsmaßstab die maximal mögliche Bildpunktauflösung in Transportrichtung. Bei einer vorgegebenen Transportgeschwindigkeit muss für eine Abbildung im richtigen Aspect Ratio die Bildpunktauflösung in Sensorrichtung auch in Transportrichtung erreichbar sein, siehe Gleichung (1).
- Anti-Blooming: Ohne Anti-Blooming-Funktion geben gesättigte Pixel, die keine weitere Ladung aufnehmen können, bei weiterer Belichtung überschüssige Ladungen an ihre Nachbarpixel ab. Besonders helle, überbelichtete Anteile des Signals verschmieren. Kameras mit Anti-Blooming-Funktion führen den Ladungsüberschuss ab.
- Integration-Control: Integration-Control entspricht der Funktion eines Shutters, die Ladungsintegration wird vor Abschluss der Belichtungsperiode abgebrochen. Bei hohen Lichtintensitäten lassen sich so Überbelichtungen verhindern. Bei nicht verfügbarer oder deaktivierter Integration-Control-Funktion ist die Integrationszeit gleich der Belichtungsperiode.
- Bei sehr lichtschwachen Objekten ist der Einsatz einer Zeilenkamera mit TDI-Sensor vorteilhaft. TDI-Zeilenkameras haben eine 96-fach höhere Lichtempfindlichkeit als vergleichbare herkömmliche Zeilenkameras.
- Nicht zuletzt bestimmt die Schnittstellenauswahl das Preis-Leistungs-Verhältnis des Zeilenkamerasystems. Kameras mit CameraLink und LVDS-Interface benötigen zusätzlich einen Grabber. GigE-Zeilenkameras sind leistungsfähiger als Kameras mit USB 2.0-Interface.

Tabelle 1 bietet eine Übersicht über einige verfügbare Zeilenkameras mit ausgewählten technischen Daten.















Typ					Pixel	Pixelgröße	Aktive Sensorlänge	Integration Control	Anti-Bloom.	Zeilenfrequenz (GigE)
 SK512VPD	SK512UPD	SK512CPD	SK512ZPD	512	10 µm	5.12 mm	x	x	83 kHz	
 SK1024VSD	SK1024USD	SK1024CSD	SK1024ZSD	1024	14 µm	14.3 mm	x	x	28 kHz	
 SK2048VPD-L	SK2048UPD	SK2048CPD	SK2048ZPD	2048	10 µm	20.5 mm	x	x	23 kHz	
 SK4096VFD-L		SK4096CFD		4096	10 µm	41 mm	x	x	27.8 kHz	
 SK7500VTO-XL	SK7500UTO-XL	SK7500CTO-XL	SK7500ZTO-XL	7500	7 µm	52.5 mm	x		5.2 kHz	
 SK8160VKO-LB		SK8160CKO-LB		8160	5 µm	40.8 mm	x	x	7.15 kHz	
 SK2048VTDI-L		SK2048CTDI	SK2048ZTDI	2048 x 96	13 µm	26.6 mm	x	x	54.4 kHz	
 SK4096VTDI-XL		SK4096CTDI	SK4096ZTDI	4096 x 96	13 µm	53.2 mm	x	x	14 kHz	
 SK12240VKOC-XL		SK12240CKOC-XL	SK12240ZKOC-XL	3 x 4080	10 µm	40.8 mm	x	x	4.8 kHz	
 SK22800VJRC-XC		SK22800CJRC-XC		3 x 7600	9.3 µm	70.9 mm	x		4.9 kHz	

TABELLE 1: Technische Daten einiger digitaler Zeilenkameras. Die in einer Tabellenzeile aufgeführten Kameras haben den gleichen Sensor, unterscheiden sich aber in ihrer Schnittstelle. Die maximale Zeilenfrequenz hängt auch von der Schnittstelle ab. Die angegebenen Werte gelten für die GigE Versionen.

Das in Abbildung 4 dargestellte Kamerasystem besteht aus der Farbzeilenkamera SK22800GJRC-XC mit GigE-Schnittstelle, einem hochauflösendem Objektiv, einem Linearschlitten, einem LED-Linienlicht und geeigneter Software.

Die LED-Beleuchtung hat eine sehr gute Homogenität über die gesamte Bildfeldbreite. Über eine Ethernet-Schnittstelle lassen sich verschiedene Beleuchtungsprofile programmieren. Damit kann die LED-Leistung optimal auf unterschiedliche Oberflächen z. B. auf verschiedene Holzsorten, abgestimmt werden. Das Scanner-Programm programmiert vor jedem Scan ein vordefiniertes Beleuchtungsprofil.

Bei einem Messbereich von 224 mm werden eine Auflösung von 30 µm/Pixel

(850 dpi) und eine Scangeschwindigkeit von 15 cm/s erreicht. Je nach Aufgabenstellung lassen sich Messbereich, Scangeschwindigkeit und Auflösung an die Spezifikationen der Anwendung anpassen. So ist bei einem Messbereich von 3 m und 64 dpi Auflösung die maximale Scangeschwindigkeit 1,9 m/s.

Plug-Scanner

Der Core-Plug-Scanner ist ein transportables Oberflächen-Scan-Makroskop für die Untersuchung von zylindrischen Prüfobjekten. Er wurde speziell für die Vorort-Inspektion von Bohrkernen entwickelt.

Der Scanner (Abb. 5) besteht aus einer Farbzeilenkamera mit GigE-Schnittstelle

(optional USB 2.0), einem Objektiv, einer LED-Beleuchtungseinheit, einer Motoreinheit mit Rotationsantrieb sowie Software für die Steuerung von Motor, Beleuchtung und Kamera. Die Rotation der Prüfkörper erfolgt mithilfe eines Zwei-Walzensystems, auf das das Prüfteil gelegt wird. Bei der Bildaufnahme dreht der Rotationsantrieb das Prüfteil unter dem Messkopf hinweg, während der der Inkrementalgeber des Antriebs die Zeilenkamera in einem winkelkonstanten Takt triggert.

Mit einer Auflösung von bis zu 2040 dpi wird so die mineralogische Zusammensetzung der Bohrkerns untersucht, um auf die Anwesenheit von Bodenschätzen wie Gold oder Öl Rückschlüsse ziehen zu können.