



Dynamisches Rauschen

Grundlagen der Bildverarbeitung: Kameraempfindlichkeit

Welche Beleuchtungsstärke ist erforderlich, damit ein auswertbares Bildsignal entsteht? Wie hell dürfen die hellsten Stellen und wie dunkel die dunkelsten Zonen im Bild sein, ohne dass die Bildauswertung zusammenbricht? Wer sich mit diesen Fragen befasst, stellt schnell fest, dass die Angelegenheit nicht mit einem kurzen Blick in das Datenblatt einer Kamera erledigt ist. In diesem Artikel erläutern wir einige grundlegende Zusammenhänge, die für die weitergehende Beschäftigung mit diesem komplexen Thema [1] wichtig sind.

Empfindlichkeit

Das Signal in CCD- und CMOS-Sensoren entsteht durch den inneren Photoeffekt. Photonen aus dem einfallenden Lichtstrom lösen im Innern eines Detektorpixels Elektronen aus. Die Wahrscheinlichkeit, mit der dies geschieht, wird als Quantenausbeute oder auch als Quantenwirkungsgrad bezeichnet. Sie hängt von der Wellenlänge der einfallenden

Strahlung ab. Die Kamerachips sprechen also nicht auf die einfallende Lichtleistung oder die Lichtenergie an, sondern auf die Zahl der einzelnen Photonen N_{ph} , die während der Integrationszeit auf den Detektor fallen. Das Quellsignal ist folglich die Zahl N_e der Photoelektronen, die innerhalb der Belichtungszeit in einem Pixel erzeugt und dort gespeichert werden, also eine Ladung. Diese Ladung wird schließlich ausgelesen und in eine Span-

nung umgesetzt, die wiederum mit einem AD-Wandler in einen digitalen Grauwert g umgewandelt wird. Der Proportionalitätsfaktor $K = g/N_e$ wird als Ausleseverstärkung (conversion gain) bezeichnet und ist eine wichtige Kenngröße einer Kamera. Zur besseren Verständlichkeit fügt man die Pseudoeinheit „DN/e“ an, „digital numbers per electron“, also Graustufen pro Elektron. Beispielsweise bedeutet die Angabe $K = 0,25 \text{ DN/e}$, dass vier Signalelektronen im Pixel eine Graustufe erzeugen. Wenn K über die gesamte Aussteuerung des Bildsignals konstant bleibt, ist das eine Aussage über die Güte des elektronischen Signalpfades in der Kamera. Es gibt Kameras mit erheblichen Abweichungen von diesem Ideal. Wenn zusätzlich die Quantenausbeute bekannt ist, kann man ausrechnen, wie viele Photonen erforderlich sind, um einen bestimmten Grauwert im digitalen Signal zu erzeugen. Umgekehrt kann man aus dem Strahlungsfluss, der auf ein Pixel fällt, und der Belichtungszeit die Zahl der einfallenden Photonen berechnen [2] und damit das Graustufensignal abschätzen. Als Empfindlichkeit kann man dann das Verhältnis s zwischen dem Grauwert und der Zahl der einfallenden Photonen in der Einheit DN/



© Wandlung/Ward/Hilber

photon angeben. Alternativ kann man den Grauwert auf die Lichtenergie beziehen, die während der Integrationszeit auf ein Pixel fällt und eine Empfindlichkeit in der Einheit DN/J angeben, wahlweise auch bezogen auf die Pixelfläche, DN/(J/m²). Ein Anwender, der ein Grauwertsignal abschätzen möchte, ist folglich dankbar, wenn der Kamerahersteller im Datenblatt die Pixelfläche und die absolute spektrale Empfindlichkeit in der Einheit DN/photon, DN/J oder DN/(J/m²) angibt und die Wellenlänge nennt, bei der dieser Wert gemessen ist. Außerdem muss die Empfindlichkeit oder die Quantenausbeute als Funktion der Wellenlänge angegeben sein, notfalls relativ, z. B. normiert auf das Maximum. Alternativ hilft auch die Angabe der Quantenausbeute und der Ausleseverstärkung K in der Einheit DN/e⁻ weiter.

Dunkelsignal und Full Well Capacity

Auch wenn kein Licht in die Kamera fällt, werden während der Integrationszeit in jedem Pixel Elektronen erzeugt und gespeichert. Dieses Dunkelsignal entsteht durch thermische Effekte im Inneren des Detektorchips und kann lediglich durch Kühlung reduziert werden.

Die Dunkelelektronen sind nicht von den Photoelektronen unterscheidbar, so dass sich das Nutzsignal und das Dunkelsignal zum Gesamtsignal addieren, $N_{ges} = N_e + N_{dark}$. Ein Detektorpixel kann nur bis zu einer Obergrenze Signalelektronen speichern, der „full well capacity“ FW. Standardkameras sind so ausgelegt, dass sich die maximale Belichtungszeit aus der Framerate ergibt und das Dunkelsignal dann weit unter der Sättigungsgrenze bleibt. In jedem Fall reduziert das Dunkelsignal jedoch den verfügbaren Signalumfang für das Nutzsignal. Wenn die FW beispielsweise 16.000 Elektronen beträgt, das Dunkelsignal aber bereits 4.000 Elektronen beiträgt, bleibt für das Nutzsignal nur noch ein Bereich von 12.000 Elektronen übrig. Mit $K = 0,25 \text{ DN/e}^-$ bleiben damit von insgesamt 4.000 Graustufen, also einem 12bit-Signal, nur noch 3.000 für das Nutzsignal. Bei zu geringer Helligkeit in der Szene kann man sich also nicht einfach damit helfen, dass man die Belichtungszeit so lange erhöht, bis das Signal hinreichend groß ist, denn das Dunkelsignal wächst mit und reduziert den effektiv nutzbaren Signalumfang. Hinzu kommt, dass die meisten Detektoren in der Nähe der FW nichtlinear werden,



LICHT IN PERFEKTION

Für jeden Einsatz die optimale Beleuchtung

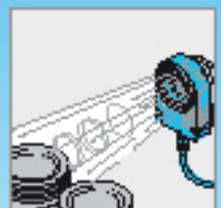


Made in Germany

- Verschiedene Bauformen
- Interne Leistungsregelung
- Homogenes Leuchtfeld
- Hohe Lichtleistung
- Hohe Schutzart IP67
- Externer Triggereingang
- Geringe Wärmeentwicklung
- Lichtintensität einstellbar
- Verschiedene Lichtfarben
- Stabile Gehäusebauform



Konturüberwachung an Blechteilen



Zusatzbeleuchtung für Kamerasysteme

dl-soric | Industrietechnik | Since 1978

d.h. das Signal hängt nicht mehr linear mit der Bestrahlungsstärke zusammen. Viele Anwender meiden daher diesen Bereich.

Rauschen

Das Signal in einem Pixel ist über die Zeit nicht konstant, sondern es rauscht. Auch unter sonst völlig gleichen Aufnahmebedingungen wird man in einer Serie von Bildaufnahmen sowohl für das Dunkelsignal als auch für das Nutzsignal eine zufällige Streuung um den jeweiligen Mittelwert feststellen. Die Wurzel aus der mittleren quadratischen Abweichung vom Mittelwert, das rms-Rauschen, ist ein Maß für diese Streuung. Für einen Teilchendetektor ist das Rauschen gleich der Wurzel aus der Zahl der Teilchen. Beträgt der Mittelwert des Signals also 16.000 Elektronen, ist diesem Mittelwert ein Fluktuationsband mit einem rms-Wert von etwa 125 Elektronen überlagert. Wenn man dieses Signal auf 12bit abbildet, also 16.000 Elektronen etwa auf den Grauwert 4.000, entspricht das rms-Rauschen von 125 Elektronen etwa 32 Graustufen. Auch die Subtraktion des Dunkelsignals hilft nicht weiter, denn im Ergebnis wird das Rauschen höher als bei jedem der beiden Einzelsignale, weil die rms-Rauschwerte sich quadratisch addieren. Je höher das Dunkelsignal wird, desto größer wird also das Rauschen im Gesamtsignal und ggf. auch im Differenzsignal, bis es völlig in der Fluktuation untergeht. Die Graustufenauflösung, die der ADC anbietet, ist folglich unter Umständen gar nicht voll nutzbar. Wie viele Graustufen man tatsächlich sehen kann, hängt vom Rauschen ab und nicht von der Auflösung des AD-Wandlers.

Dynamikbereich

Die Verhältnisse in der Nähe der Sättigung haben wir bereits betrachtet. Bei geringen Signalen muss außerdem das Ausleserauschen berücksichtigt werden. Auch bei tatsächlich identischer Zahl von Signalelektronen fluktuiert der Grauwert bei mehreren aufeinander folgenden Auslesevorgängen um einen Mittelwert. Der rms-Wert dieser Fluktuation ist das Ausleserauschen, und man muss damit rechnen, dass das Ausleserauschen größer ist als eine Graustufe, die der AD-Wandler erzeugt, z.B. fünf Elektronen. Als Kenngröße gibt man oft das Verhältnis zwischen dem Sätti-

gungssignal und dem Ausleserauschen an und bezeichnet diesen Quotienten als den Dynamikbereich DR (dynamic range). In unserem Beispiel wäre der Dynamikbereich also $16.000/5 = 3.200$ oder 70 dB. Für eine Industriekamera wäre das schon ein beeindruckender Wert. Das bedeutet aber nicht, dass man tatsächlich 3.200 Graustufen sehen kann, denn das Signalrauschen kommt hinzu. In der Nähe der Sättigung beträgt das Signalrauschen etwa 125 Elektronen, also das 25-fache des Ausleserauschens. Deshalb ist es auch irreführend, den Dynamikbereich als Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) zu bezeichnen, wie dies in manchen Datenblättern geschieht. In der Nähe der Sättigung ist in unserem Beispiel das Signal-Rausch-Verhältnis lediglich etwa 125, und besser kann es über den ganzen Signalbereich auch nicht werden. Auch dieser Wert ist bereits ein Optimalwert, denn die Folgeelektronik kann (und wird meist auch) dem Signal weitere Rauschteile hinzufügen. Damit ein Signal sich verlässlich vom Rauschen unterscheidet, fordert man meist ein SNR von mindestens 10. In unserem Beispiel wäre bei 120 Elektronen das Gesamttrauschen bei Vernachlässigung des Dunkelsignals etwa 12 Elektronen, d.h. die Graustufe 30 wäre bei einem Rauschen von drei Graustufen sicher erkennbar. Ab Graustufe 400 hätte man mit $SNR = 40$ bei einem Rauschen von etwa 10 Graustufen eine sehr gute Signalqualität. An diesem Beispiel wird bereits deutlich, dass die Überlegungen in Bezug auf die Auslegung von Algorithmen an dieser Stelle noch nicht beendet sind. Wenn man Graustufendifferenzen sicher erkennen will, kommt es auf das absolute Rauschen an, so dass in dunkleren Bildbereichen andere Kriterien gelten als in sehr hellen Zonen.

Fazit

Wer die Graustufenwerte im Kamerabild abschätzen will, sollte für die hellsten und die dunkelsten Stellen der Szene messen oder berechnen, welche Lichtenergie oder welche Zahl von Photonen während der Integrationszeit auf ein Pixel fallen wird. Dabei muss die Spektralverteilung beachtet werden. Aus der Quantenausbeute und der Ausleseverstärkung oder einer alternativen Empfindlichkeitsangabe ergeben sich dann die Grauwerte. Wenn das Signal in den dunklen Bereichen nicht ausreicht, kann

man die Blende weiter öffnen oder mehr Licht zur Beleuchtung anbieten. Dabei muss man beachten, dass die hellen Bereiche nicht in Sättigung geraten dürfen. Auch längere Belichtungszeiten führen zu höheren Signalen, das Dunkelsignal steigt aber ebenfalls an. Man kann auch die Verstärkung erhöhen, das Rauschen an der Signalquelle wird jedoch ebenfalls verstärkt. Wenn die hellen Stellen in Sättigung sind, kann man mit denselben Mitteln das Signal reduzieren. Anschließend rechnet man aus, ob das Signal-Rausch-Verhältnis sowohl in den Lichtern als auch in den Schatten für die geplanten Algorithmen ausreicht. Falls nicht, sollte man nach einer Kamera mit höherer Quantenausbeute suchen, die Beleuchtung spektral so abstimmen, dass sie im Maximum der Quantenausbeute liegt, den Dunkelstrom reduzieren (z.B. durch kürzere Integrationszeit und abgestimmte Blitzbeleuchtung), oder ein Modell mit höherer FW und geringerem Ausleserauschen, also einem besseren Wert für den Dynamikbereich wählen. Abschließend sei ein Blick in die Norm EMVA 1288 [3] empfohlen. Dort werden weitere Effekte behandelt, die bei manchen Kameras wichtig sind, z.B. das fixed-pattern-Rauschen und in der Version 3.0 auch die Charakterisierung von Kameras mit nichtlinearer Kennlinie.

Literatur

- [1] G. C. Holst, CCD Arrays, Cameras and Displays, 2nd ed., SPIE 1998
- [2] INSPECT 2/2010, S. 18, Strahlende Präsenz, Grundlagen der optischen Messtechnik: Radiometrie
- [3] www.emva.org/standard1288

► **Autor**
Prof. Dr. Christoph Heckenkamp
 Hochschule Darmstadt
 Studiengang Optotechnik und
 Bildverarbeitung
heckenkamp@h-da.de
www.fbm.h-da.de

