

CCD oder CMOS – ein Praxisbericht

JÜRGEN PEIPE, Neubiberg & CARL-THOMAS SCHNEIDER, Braunschweig

Keywords: CCD sensor, CMOS sensor, photogrammetric performance evaluation, test measurement

Zusammenfassung: Es werden die Ergebnisse eines Tests mitgeteilt, bei dem die photogrammetrische Leistungsfähigkeit von sechs CCD bzw. CMOS Kameras an Hand der Messung eines 3D-Prüfkörpers ermittelt wurde. Zudem wird auf die besonderen Eigenschaften von CMOS Sensoren eingegangen.

Summary: *CCD or CMOS – a field test.* The photogrammetric performance of six types of CCD and CMOS cameras was evaluated by 3-D test-field measurements. In addition, some specifications of CMOS sensors are reported on.

1 Einleitung

Digitalkameras sind wesentlicher Bestandteil photogrammetrischer Nahbereichs-Messsysteme. Kameras mit fester Verbindung zu einem Rechner erlauben die Aufnahme rascher Bildfolgen und sind für online bzw. realtime Anwendungen geeignet. Kameras ohne Verbindung zu einem Rechner, aber mit interner Energieversorgung, Steuerelektronik und Datenspeicherung (Still Video Kameras), haben sich seit vielen Jahren in der Offline Photogrammetrie bewährt. Die in den Kameras eingebauten Flächensensoren weisen typische Pixelzahlen von $\leq 1000 \times 1000$ bis ca. 4000×4000 auf, je nach Aufgabengebiet und technischer Spezifikation. So steht zum Beispiel die Bildfolgezeit in Konkurrenz zur Sensorgröße: Hochgeschwindigkeitskameras erfassen mehrere Hundert Bilder pro Sekunde mit einer Auflösung von 1000×1000 Bildelementen, eine Kamera mit hoher Pixelzahl kann dagegen ein paar Sekunden für Aufnahme und Speicherung eines Bildes benötigen.

Die Sensorarchitektur moderner Digitalkameras beruhte bis vor kurzem im Wesentlichen auf der CCD-Technologie (CCD =

Charge Coupled Device), die sich über die Jahre hin bewährt und durchgesetzt hat. Seit einiger Zeit kommen jedoch rasch zunehmend CMOS-Sensoren (CMOS = Complementary Metal-Oxide Semiconductor) und mit ihnen ausgerüstete Kameras auf den Markt – ausgehend wohl von Anwendungen der Bildverarbeitung und optischen Produktkontrolle in der Industrie, bei denen sich die vorteilhaften Aspekte der CMOS-Technologie besonders deutlich zeigen. Bei den Still Video Kameras – vom „Massenmarkt“ der Consumer Kameras bis zu den „High End“ Kameras des Profi-Photographen – war von dieser Entwicklung lange Zeit wenig zu spüren. Es gab einige niedrig auflösende Kameras mit zweifelhafter Bildqualität (z. B. YAMADA et al. 1998); dann jedoch wurde im Jahr 2000 plötzlich eine ausgereifte Spiegelreflexkamera mit einem 3.1 Mio. CMOS Sensor präsentiert, die Canon EOS D30. Das bis zu diesem Zeitpunkt als Hauptnachteil der CMOS-Technologie angeführte starke Bildrauschen (siehe Kap. 2) konnte bei dieser Kamera minimiert werden. Ebenfalls im Jahr 2000 wurde auf der Photokina der Prototyp eines 16 Megapixel CMOS Sensors der Fa. Foveon vorgestellt – zeitlich parallel und in der Pixelzahl eben-

bürtig dem 16 Megapixel CCD Sensor im digitalen Rückteil Kodak DCS Pro Back. Die weitere Entwicklung hochauflösender und damit für die photogrammetrische Anwendung besonders interessanter Sensoren und Kameras kulminierte anlässlich der Photokina 2002, als drei neue Spiegelreflexkameras Tagesgespräch waren, alle drei mit einem CMOS Sensor ausgerüstet: die Canon EOS 1Ds mit einem 11 Mio. Pixel Chip (4064×2704 Bildelemente) und die Kodak DCS Pro 14n mit knapp 14 Mio. (4536×3024), beides so genannte Vollformatsensoren, die also das Kleinbildformat von $24 \text{ mm} \times 36 \text{ mm}$ ausfüllen – und als dritte Kamera die Sigma SD-9 mit dem neuartigen Foveon X3-Bildsensor. Dieser 3.4 Mio. Pixel CMOS Sensor ist schichtförmig so aufgebaut, dass jeder Bildpunkt die Farbinformation für Rot, Grün und Blau liefert – im Gegensatz zur üblichen Vorgehensweise, bei der ein Pixel durch ein Farbfilter-Mosaik hindurch nur eine Grundfarbe erfasst und die Gesamtinformation durch Farbinterpolation erhalten wird.

Es ist also an der Zeit zu untersuchen, was den photogrammetrischen Anwender erwartet, wenn er eine der neuen CMOS Kameras in seinem 3D-Messsystem verwenden will – dies im Vergleich zu bisher üblichen CCD Kameras. Im Folgenden werden daher sechs Spiegelreflexkameras mit Auflösungen von 6 bis 14 Mio. Bildpunkten miteinander verglichen. Der Vergleich bezieht sich auf die Ergebnisse von Bündelausgleichungen eines Testkörpers, unter gleichen Bedingungen für alle Kameras. Es wurden mehrere Datensätze pro Kamera erzeugt und als Bewertungskriterium die Längenmessabweichung an kalibrierten Maßstäben verwendet.

2 CCD und CMOS

CCD und CMOS Sensoren sind Festkörper-Bildsensoren (solid-state sensors), bestehend aus Halbleiter-Bauelementen, die in der Lage sind, auftreffendes Licht in ein entsprechendes Muster elektrischer Ladungen umzuwandeln. Einzelne lichtempfindliche Elemente (in der Regel Photodioden) wer-

den zu Zeilen- bzw. Flächensensoren zusammengesetzt. Der Ladungsinhalt der Photodioden muss nach erfolgter Belichtung abtransportiert und weiterverarbeitet, d. h. in digitale Bildinformation umgesetzt werden. Hierbei unterscheiden sich CCD und CMOS Sensoren erheblich voneinander und begründen damit auch Stärken und Schwächen der jeweiligen Technik.

Ohne auf Details einzugehen (siehe hierfür z. B. BLANC 2001), wird bei CCD Sensoren die Ladung der Einzelemente während der Belichtungszeit – bei geöffnetem elektronischen Shutter – gesammelt (Integrationsphase). Anschließend erfolgt das Auslesen nach dem Prinzip der zeilen- bzw. spaltenweisen Ladungsverschiebung, d. h. die Ladungen werden getaktet nacheinander in Ausleseregister verschoben, so dass letztlich ein kontinuierliches analoges Signal entsteht, das noch verstärkt und in einem Analog-/Digital-Wandler digitalisiert wird. Nachteilig ist, dass beim Ladungstransport über lichtempfindliche Sensorflächen hinweg Verschmierungen auftreten können. Ein weiteres Problem von CCD Sensoren sind Überstrahlungseffekte (Blooming), die entstehen, wenn Ladungen bei zu hoher Lichtintensität während der Integrationsphase in benachbarte Pixel überfließen und so die Information in einem Teilbereich des Bildes verfälscht bzw. unlesbar wird. Insgesamt gesehen erzeugen CCD Sensoren jedoch sehr gute, rauscharme Bilder.

CMOS Bildelemente lassen sich im Gegensatz zu CCD Bildelementen einzeln adressieren und auslesen, indem das gewünschte Element über die Zeilen- und Spaltennummer ausgewählt wird. Dies ist zum einen für die Korrektur fehlerhafter Pixel von Vorteil, zum anderen aber auch, wenn nur Teilbereiche des Bildes (areas of interest), diese aber oft und sehr rasch erfasst werden sollen. Schmier- und Überstrahlungseffekte treten nicht auf, da Ladungen nicht verschoben werden und Ladungsüberlauf vermeidbar ist. CMOS Sensoren werden daher zunehmend für industrielle Anwendungen unter schwierigen Beleuchtungsbedingungen oder z. B. für Überwachungsaufgaben in der Sicherheitstech-

nik eingesetzt. Ein weiterer wesentlicher Vorteil der CMOS Sensorarchitektur liegt darin, dass in jedem Pixel die Photodiode mit Schaltungen zur Ansteuerung, Signalauslesung und Signalverarbeitung integriert werden kann (letztlich: camera on the chip). Dies führt wiederum zu raschen Auslesezeiten und auch zu niedrigen Betriebstemperaturen und niedrigem Energieverbrauch (1/3 bis 1/10 der Energie eines entsprechenden CCD Modells).

Als wesentlicher Nachteil von CMOS Sensoren wird das gegenüber CCD Sensoren stärkere Rauschen angesehen. Hier ist in den letzten Jahren viel Forschungsarbeit geleistet worden, so dass sowohl das zeitliche Rauschen als auch die stabile Bildstörung (fixed pattern noise) durch saubere Signalverarbeitung unter Kontrolle gebracht werden können. So liegen viele Vorteile auf Seiten der CMOS Sensoren – als letztes seien die günstigen Herstellungskosten vor allem auch von Chips mit großen Pixelzahlen genannt, da sie auf Standard-Halbleiter-Fertigungsstraßen produziert werden können und nicht in komplexen, hoch spezialisierten Anlagen wie die CCD Sensoren.

Was bringt die Zukunft? Die in der Fachliteratur dargestellte Aufregung über den „Kampf der Systeme“ hat sich inzwischen gelegt: Statt „A Challenge for CCDs“ (CONNOLLY 2001) und „CMOS vs. CCD: The Battle Continues“ (WILLIAMS 2001) heißt es nun „CCD vs. CMOS: The Battle Cools Off“ (LITWILLER 2002). Es ist also damit zu rechnen, dass die beiden Technologien zu-

nächst nebeneinander existieren werden, mit größeren Zuwachsraten auf Seiten der CMOS Sensoren.

3 Kameratest

Sechs digitale Spiegelreflexkameras standen für die Untersuchungen zur Verfügung, vier davon ausgerüstet mit CCD Sensoren und zwei CMOS Modelle (Tab.1 zeigt einige technische Daten). Die Auflösung betrug 6 Megapixel, mit Ausnahme der neuen Kodak DCS Pro 14n, die knapp 14 Mio. Bildelemente aufweist. Die Kodak DCS 660 ist als Standardkamera in photogrammetrischen 3D-Messsystemen seit langem bewährt. Ihre Vorgängerin war die DCS 460 – im vorliegenden Test wird eine Kamera aus dem Jahr 1995 eingesetzt. Die Fuji FinePix S2 Pro und die Nikon D1X ergänzen das Feld der Kameras mit CCD-Technologie.

Ein paar Worte noch zu den beiden CMOS Kameras: Die Canon EOS D60 ist Nachfolger der in Kap.1 genannten D30 und bietet sich – zusammen mit der Fuji FinePix S2 Pro – als preiswerte, semiprofessionelle Alternative zu den anderen Kameras an. Als Folge der rasanten Entwicklung auf dem Fotomarkt wurde die D60 inzwischen – nach nur einem Jahr auf dem Markt – vom Modell Canon EOS 10D ersetzt. Bei gleichem Sensor dürften allerdings die Abbildungseigenschaften der beiden Kameras ähnlich sein. Die Kodak DCS Pro 14n setzt neue Maßstäbe hinsichtlich Auflösung und Sensorformat. Der 13.9 Megapixel CMOS

Tab. 1: Technische Daten der untersuchten Kameras.

Kamera	Chip-technologie	Sensorformat [mm]	Sensorformat [Pixel]	Verwendetes Objektiv
Kodak DCS Pro 14n	CMOS	36 × 24	4536 × 3024	35 mm
Kodak DCS 660	CCD	27,4 × 18,1	3040 × 2008	24 mm
Nikon D1X	CCD	23,7 × 15,6	3008 × 1960	20 mm
Canon EOS D60	CMOS	22,1 × 14,9	3072 × 2048	24 mm
Fuji FinePix S2 Pro	CCD	23,3 × 15,6	3024 × 2016	24 mm
Kodak DCS 460	CCD	27,6 × 18,4	3072 × 2048	24 mm

Sensor im vollen Kleinbildformat erlaubt die Verwendung aller Nikon-Kleinbildobjektive, ohne einen „Verlängerungsfaktor“ berücksichtigen zu müssen.

4 Photogrammetrische Messungen

Seit einiger Zeit steht für die Abnahme und Überprüfung von optischen 3D-Messsystemen die VDI/VDE Richtlinie 2634 (VDI/VDE 2002) zur Verfügung. Im Blatt 1 dieser Richtlinie wird ein Verfahren zur Überprüfung von optischen Messsystemen mit punktförmiger Antastung beschrieben. Dabei wird die dreidimensionale Längenmessabweichung als Differenz zwischen gemessenem und kalibriertem Abstand zweier Punkte bestimmt. Zur Ermittlung der Längenmessabweichung wird ein Prüfkörper vorgesehen, der ein fest definiertes Messvolumen besitzt. In diesem Messvolumen werden sieben Messlinien in allen Koordinatenrichtungen durch kalibrierte Maßstäbe realisiert.

In Anlehnung an diese Vorgehensweise wurde zur Untersuchung der Kameras ein

Prüfkörper aus insgesamt 17 CFK-Maßstäben in einem Messvolumen von ca. 2.000 mm × 1.500 mm × 500 mm aufgebaut (Abb. 1). Die 17 Maßstäbe mit jeweils zwei Messpunkten wurden vom Deutschen Kalibrier-Dienst (DKD) kalibriert und sind mit einer Genauigkeit von $\pm 10 \mu\text{m}$ zertifiziert. Der Prüfkörper wurde mit jeder Kamera in gleicher Weise aufgenommen. Abb. 2 zeigt einen Grundrissplan der Kamerastandorte. Von jedem Standort wurde der Prüfkörper in vier verschiedenen Höhen aufgenommen (1.000 mm, 1.500 mm, 2.000 mm, 2.500 mm). Zusätzlich wurden vier gekantete Bilder zur Verbesserung der Bestimmung der inneren Orientierung aufgenommen, die im Rahmen einer Simultankalibrierung erfolgte.

Die Digitalaufnahmen wurden mit der AICON Photogrammetriestation DPA-Pro ausgemessen, und es wurden im Rahmen der Bündelausgleichung in üblicher Weise 3D Objektkoordinaten berechnet. Aus den ausgeglichenen Punktkoordinaten ergaben sich anschließend die Ist-Strecken der Maßstäbe. Tab. 2 zeigt die Ergebnisse der Berechnung

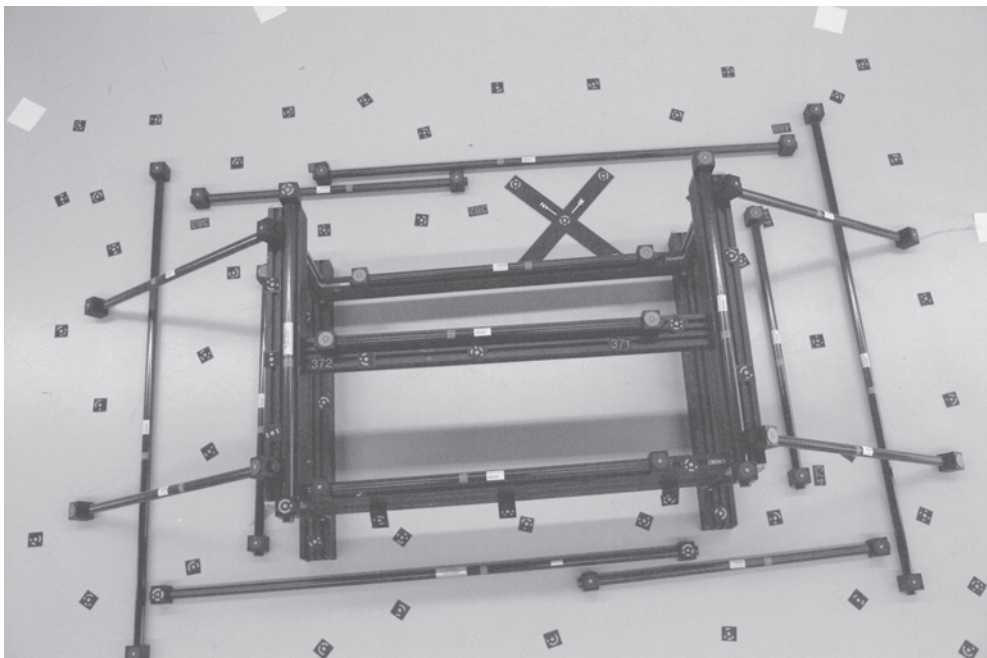


Abb. 1: Prüfkörper, bestehend aus 17 Maßstäben und Verknüpfungspunkten.

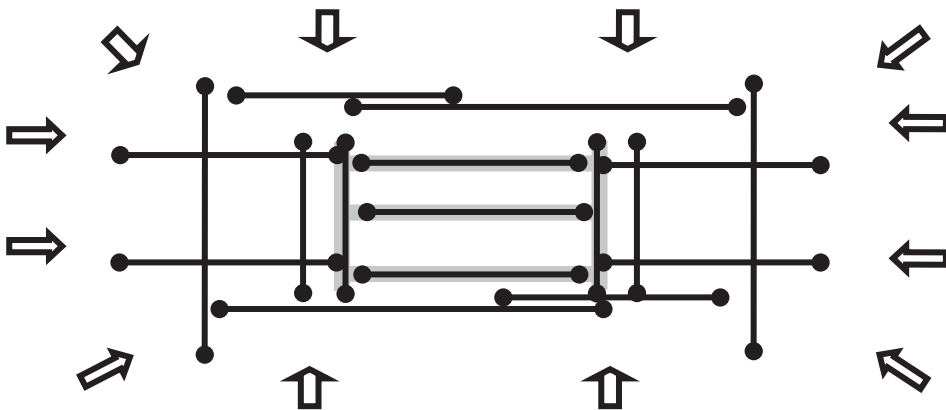


Abb. 2: Schematische Darstellung der Aufnahmestandpunkte.

und den Vergleich mit den Soll-Daten aus der DKD Kalibrierung.

Nimmt man die Spanne als charakterisierenden Genauigkeitswert, so zeigt sich – wie zu erwarten war – die Kamera mit der größten Pixelzahl, also die Kodak DCS Pro 14n, als überlegen, allerdings mit nicht allzu großem Abstand zum über Jahre bewährten Produkt DCS 660, die trotz ihrer „nur“ 6 Megapixel hervorragend abschneidet. Umgekehrt betrachtet bedeutet dies, dass eine mit der Pixelzahl linear steigende Genauigkeit nicht vorausgesetzt werden kann – bzw., dass beim CMOS Sensor noch Genauigkeitsreserven vorhanden sind, sei es durch eine verbesserte Sensorarchitektur oder durch noch leistungsfähigere Software. Ein

Grund für die relativ geringe Genauigkeitssteigerung kann auch darin liegen, dass wegen der Vollformatsensoren nun die Randbereiche der Kleinbildobjektive ebenfalls zur Abbildung herangezogen werden, was bisher nicht geschah. Objektivfehler würden sich stärker auswirken, und es ist die Frage, ob die Modellierung der Bildraumparameter in der Simultankalibrierung für diesen Fall genügt.

Sehr nah zur DCS 660 liegen die Ergebnisse der Nikon D1X, ebenfalls ein bewährtes Produkt in photogrammetrischen 3D-Messsystemen. Die preiswerteren 6 Megapixel Kameras folgen mit etwas Abstand – allerdings untereinander gleichauf, was für die Qualität des CMOS Sensors der Canon EOS D60 spricht. Sieht man allerdings die Differenz zwischen den 74 µm der DCS Pro 14n und den 120 µm der FinePix S2 Pro, so zeigt sich hier ein deutlicher Genauigkeitsabstand, dies bei etwa einem Drittel der Anschaffungskosten für die „einfacheren“ Kameras gegenüber der hochauflösenden. Aufgabenstellung und vorhandene Finanzmittel sind ausschlaggebend, für welche Kamera und welche Genauigkeit man sich entscheidet.

Letztlich ist das mit der DCS 460 erzielte Ergebnis zu kommentieren. Wie in Kap. 3 erwähnt, handelt es sich bei dieser Kamera um ein bereits acht Jahre altes und permanent eingesetztes Modell mit dem damaligen, instabileren Gehäuse und dem „alten“,

Tab. 2: Ergebnis der Testmessungen.

Kamera	Größte untere Abweichung [µm]	Größte obere Abweichung [µm]	Spanne [µm]
Kodak DCS Pro 14n	- 33	41	74
Kodak DCS 660	- 58	41	99
Nikon D1X	- 55	47	102
Canon EOS D60	- 44	72	116
Fuji FinePix S2 Pro	- 62	58	120
Kodak DCS 460	- 42	145	187

noch nicht befestigten Sensor, so dass das Ergebnis nicht verwundern darf. Es ist eher als Hinweis darauf zu werten, dass die später entwickelten Kameras – gerade das Nachfolgemodell DCS 660 – um vieles leistungsfähiger geworden sind.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Durch mehrfachen Test einer Reihe digitaler CCD und CMOS Kameras konnte gezeigt werden, dass Kameras mit CMOS Sensoren den bisher üblichen CCD Kameras durchaus gleichwertig sind, was die Genauigkeit der photogrammetrischen 3D-Objektrekonstruktion betrifft – wenn sich auch der „Quantensprung“ bei der Pixelzahl von 6 zu 14 Megapixeln nicht gleichermaßen in den Ergebnissen spiegelt. Es ist zu erwarten, dass sich die Qualität der CMOS Bilder durch neue Sensoren und Softwareentwicklungen weiter verbessern wird.

Abschließend sei betont, dass sich die Autoren dieses Berichts darüber im Klaren sind, dass ihre Untersuchungsergebnisse nur einen Zwischenstand darstellen können. Ständig werden neue Kameras angeboten; was heute noch „High-End-Profi“ heißt, ist vielleicht morgen schon in einer preiswerten Consumer Kamera eingebaut. In jedem Fall dokumentiert die vorliegende Untersuchung den hohen Stand der Entwicklung digitaler Aufnahmesysteme und ihre Eignung für Anwendungen in der Nahbereichsphotogrammetrie.

Literatur

- BLANC, N., 2001: CCD versus CMOS – has CCD imaging come to an end? – In: FRITSCH, D. & SPILLER, R.(ed.): Photogrammetric Week '01. – pp.131–137, Wichmann Verlag, Heidelberg.
- CONNOLLY, CH., 2001: A challenge for CCDs. – *Photonics Spectra* (11): 106–107.
- LITWILLER, D., 2002: CCD vs. CMOS: The battle cools off. – *Photonics Spectra* (1): 102–103.
- VDI/VDE, 2002: VDI/VDE-Richtlinie 2634 Optische 3D-Messsysteme. – Beuth Verlag, Berlin.
- WILLIAMS, C., 2001: CMOS vs. CCD: The battle continues. – *Advanced Imaging* (9): 28–31.
- YAMADA, N., CHIKATSU, H., ANAI, T., 1998: On the application of CMOS image sensor to digital photogrammetry. – *Int. Arch. Photogrammetry & Rem. Sensing*, **32/5**: 185–188, Hakodate.

Anschrift der Autoren:

Dipl.-Ing. JÜRGEN PEIPE
 Universität der Bundeswehr München
 D-85577 Neubiberg
 e-mail: juergen.peipe@gmx.de

Dr. CARL-THOMAS SCHNEIDER
 AICON 3D Systems GmbH
 D-38114 Braunschweig
 e-mail: ct.schneider@aicon.de

Manuskript eingereicht: Juli 2003

Angenommen: Juli 2003