

Zur Entwicklung der Aufnahmetechnik in der Nahbereichsphotogrammetrie

JÜRGEN PEIPE, Neubiberg

Keywords: digital camera, image acquisition, CCD sensor, CMOS sensor

Zusammenfassung: In diesem Bericht wird der momentane Stand digitalerameratechnik beschrieben. Spezifika einzelner Kameratypen und Bedingungen für deren Einsatz in der Nahbereichsphotogrammetrie werden genannt.

Summary: *On the development of image acquisition techniques in close range photogrammetry.* In this paper, the state-of-the-art in digital camera technology is described, specific features of several camera types are reported on. Some prerequisites for using these imaging devices for close range photogrammetry applications are discussed.

1 Vorbemerkung

Unter einem ähnlichen Titel veröffentlichte der Autor dieses Beitrags kurz nach dem Tod von WILFRIED WESTER-EBBINGHAUS einen Bericht zum Stand der Technik der in der Nahbereichsphotogrammetrie eingesetzten Kamerasysteme und berücksichtigte dabei insbesondere die Arbeiten des Verstorbenen auf diesem Gebiet (PEIPE 1994). WESTER-EBBINGHAUS war es gelungen, durch den Entwurf von analogen Réseaukameras wie der Rollei SLX/6006 und Rollei LFC die Beschränkungen der bis dahin üblichen Messkameras zu überwinden und so der Nahbereichsphotogrammetrie zu neuen Anwendungsmöglichkeiten, vor allem in der Industrie, zu verhelfen.

Zum damaligen Zeitpunkt stand auch bereits eine Vielzahl digitaler Aufnahmekameras zur Verfügung, und zwar „einfache und preiswerte Camcorder, Standard-CCD-Videokameras mit z. B. 768×512 Bildelementen, noch relativ teure CCD-Kameras höherer Auflösung (1000×1000 bis 4000×4000 Bildelemente) und schließlich Still-Videokameras mit bis zu 1500×1000 Bildelementen“ (PEIPE 1994). WESTER-EBBINGHAUS hat sich mit dem Thema Digitalkameras vor allem im Zusammenhang mit

der Konstruktion des Réseau-Scanners und der Réseau-Scanning-Kamera befasst, außerdem mit Fragen der Kalibrierung und Systemgenauigkeit. In den folgenden Jahren wurden digitale Kameras bekanntlich entscheidend weiterentwickelt in Richtung höhere Auflösung und Speicherfähigkeit, raschere Aufnahmefolge, Qualität der Abbildung etc. Dies führte, zusammen mit immer schnelleren Rechnern und effizienter Software, zur Generierung flexibler, weitgehend automatisierter und nutzerfreundlicher photogrammetrischer 3D-Messsysteme.

2 Anforderungen der photogrammetrischen Messtechnik

Heutzutage werden in der nahbereichsphotogrammetrischen Praxis in der Regel Digitalkameras verwendet – mit Ausnahme einiger Anwendungen in der Architektur, bei denen noch analoge fotografische Aufnahmetechnik zum Einsatz kommt.

Digitale Kameras werden üblicherweise nicht für die speziellen Bedürfnisse der Photogrammetrie hergestellt. Hier sind vor allem hohe Anforderungen an die Stabilität der Kamerageometrie zu nennen, d. h. das System Objektiv-Kamerakörper-Sensor soll

bei der Aufnahme mechanisch stabil sein und möglichst feste Brennweite und feste Fokussierung aufweisen. Abweichungen hiervon führen bestenfalls dazu, den Auswerteaufwand zu erhöhen, z. B. durch aufwändigere Kalibriertechnik (LUHMANN & GODDING 2004), im ungünstigsten Fall sind die Aufnahmen unbrauchbar. Zu bedenken ist, dass die Genauigkeit im Bild bei der automatischen Messung von Zielmarken ca. 0.2–0.5 µm betragen kann, also sehr hoch ist. Unkontrollierte Veränderungen der inneren Orientierung der Aufnahmekamera können daher nicht hingenommen werden.

Hohe Pixelzahl und großes Bildformat sind erwünscht, um Objekte möglichst fein auflösen zu können und eine hohe Genauigkeit der Objektrekonstruktion zu erzielen. Natürlich hängt die auf die jeweilige Anwendung zu beziehende Qualität eines Aufnahmesystems nicht allein von der Pixelzahl ab, sondern – neben den oben genannten Stabilitätskriterien – von äußeren Faktoren wie der Beleuchtung und generell der Kooperation des Objekts (diffuse oder spiegelnde Oberfläche, Messung von natürlichen oder signalisierten Punkten etc.), aber auch von der Fertigungsqualität und dem Zusammenspiel der optischen und elektronischen Komponenten. Wichtig sind zum Beispiel eine zur Auflösung des Sensors passende Objektivauflösung, die Objektivqualität selbst (Abbildungsfehler, Verwendung spezieller „digitaler“ Objektive), ein möglichst fehlerfrei hergestellter Sensor (Fehler einzelner Sensorelemente und Unebenheiten der Sensorfläche können auftreten, vor allem bei großen Sensorflächen), ein günstiges Signal-Rausch-Verhältnis, rasche Bildfolge und rasches Auslesen unkomprimierter oder möglichst verlustfrei komprimierter Bilddaten, ein großer und preiswerter Bilddatenspeicher u.a.m.

Es existieren einige wenige photogrammetrische Spezialentwicklungen, d. h. speziell für Messzwecke entworfene Kameras, in die auch ein Rechner für die automatische Erkennung und Messung signalisierter Punkte integriert ist (Imetric ICam 28 mit 7168 × 4096 Pixel (BEYER 1999) und GSI IN-CA3 mit 3500 × 2350 Pixel (GSI 2003)). Lei-

der erfordern diese Kameras hohe finanzielle Investitionen. Relativ preiswert zeigt sich eine Entwicklung der Fa. Rollei, die Kamera d7 metric⁵ mit 5 Mio. Bildelementen, die eine Reihe metrischer Eigenschaften aufweist. Sensor und Optik sind fest miteinander verbunden, das Objektiv (Festbrennweite) ist in einer bestimmten Entfernungsstellung fixiert (PEIPE & STEPHANI 2003). Hier ist zu erwarten, dass die einmal kalibrierten Werte der inneren Orientierung über einen längeren Zeitraum erhalten bleiben.

Im Folgenden sollen einige Kameratypen kurz beschrieben werden. Als Kriterium gilt zunächst, ob eine Digitalkamera ständig mit einem Rechner verbunden ist (online) oder nicht (offline). Auf (digitale) Camcorder und spezielle Entwicklungen wie scannende bzw. Panoramakameras wird in diesem Bericht nicht näher eingegangen.

3 Online-Digitalkameras

Digitale Kameras mit Rechnerverbindung werden vorzugsweise für fest definierte Aufgaben in der industriellen Fertigung (Produktionsüberwachung, Qualitätssicherung) eingesetzt. In der Regel sind dabei eher hohe Bildraten als hohe Pixelzahlen von Bedeutung. Die Kabelverbindung zwischen Kamera und Rechner dient zum Energie- und Informationstransport. Soll der Kamerateil klein ausfallen, so muss er im Wesentlichen nur Objektiv und Sensor umfassen, während Kamerasteuerung, Stromversorgung, Framgrabber, Datenspeicher etc. im Rechner angeordnet sind. Umgekehrt können wesentliche Teile der Elektronik in die Kamera eingebaut werden, um dadurch die Datenverarbeitung so nah wie möglich an der Bildaufnahme geschehen zu lassen (weniger Datentransfer, bessere Bildqualität).

Während Standard-Videokameras im Videotakt von 25 Bildern pro Sekunde Informationen liefern, können mit Hochgeschwindigkeitskameras wesentlich mehr Bilder bei dennoch recht hohen Pixelzahlen erreicht werden, z. B. 500 Bilder/s mit 1280 × 1024 Pixel (MIKROTRON 2003). Eine High-End Kamera zeigt Leistungsdaten wie 1000 B/s bei 1536 × 1024 Bildpunkten, 2000

B/s bei 1024×768 , 4000 B/s bei 768×512 und 10000 B/s bei 512×192 (WEINBERGER 2003). Bei solchen Bildraten beträgt die Aufzeichnungsdauer insgesamt allerdings nur noch wenige Sekunden.

Die beeindruckenden Spezifikationen dieser Kameras lassen sich aus mehreren Gründen erreichen. Sie sind nicht mehr mit CCD Sensoren, sondern mit CMOS Sensoren ausgerüstet, die gerade in der industriellen Bildverarbeitung entscheidende Vorteile haben (PEIPE & SCHNEIDER 2003). Auf die einzelnen Bildelemente eines CMOS Sensors kann über die Zeilen- und Spaltennummer direkt zugegriffen werden. So kann – im Gegensatz zur sequentiellen Vorgehensweise bei CCD Sensoren – ein CMOS Sensor wesentlich schneller ausgelesen werden, und erst recht, wenn man auf dem Sensor einen Bildausschnitt (ROI = region of interest) definiert und nur diesen ausliest. Weitere Vorteile der CMOS Technik sind hohe Bildkontraste, Anpassung jedes Pixels an die vorhandenen Beleuchtungsverhältnisse, keine Überstrahlungs- und Verschmierungseffekte und geringere Stromaufnahme.

Um die erheblichen Datenmengen solcher schnellen und relativ hoch auflösenden Kameras sinnvoll zu übertragen, bedarf es spezieller digitaler, standardisierter Interfaces (z. B. KIMMELMANN & RAUSCHER 2001). Hier seien – ohne weitere Erläuterungen – die Standards CameraLink und IEEE 1394 (FireWire) genannt.

4 Offline-Digitalkameras

Bei Still Video Kameras sind alle zur Bedienung und zum Betrieb notwendigen Komponenten – inklusive einer wechselbaren Speicherkarte für die Zwischenspeicherung der Bilddaten – in die Kamera selbst eingebaut. Dieser Offline-Kameratyp hat im letzten Jahrzehnt eine rasante Entwicklung erfahren, gekennzeichnet durch stetige Zunahme von Pixelzahl, Sensorformat und Speicherplatz sowie einer damit parallelen Verminderung der Kosten, d. h. es gibt immer mehr Leistung für weniger Geld.

Man unterscheidet preiswerte Consumer-Kameras, konzipiert für den allgemeinen

Gebrauch eines Amateur-/Hobbyfotografen, die allerdings hohe Pixelzahlen (3 bis 5 Megapixel) und modernsteameratechnik aufweisen, und hochauflösende Profi-Kameras zur Anwendung z. B. in der journalistischen Praxis oder für Katalog- und Still-Life-Fotografie im Studio. Solche Systemkameras mit Spiegelreflex-Technik, Wechselobjektiven und vielen Spezialfunktionen entsprechen in ihrer Arbeitsweise den analogen SLR-Modellen. Im hochpreisigen Segment kommen noch digitale Rückteile hinzu, die an vorhandene (analoge) Kamerakörper adaptiert werden können.

Wie sieht es nun mit der photogrammetrischen Eignung solcher Aufnahmesysteme aus, die generell als Nicht-Messkameras zu bewerten sind? Vorsicht ist bei den Consumer-Kameras geboten, bei denen eine Reihe von Problemen auftreten können, z. B.:

- das Kameragehäuse ist nicht stabil genug, der Sensor nicht fest damit verbunden;
- Zoom und automatische Fokussierung verändern die innere Orientierung;
- relativ niedrig auflösende Objektive aus dem Videobereich;
- kleiner Sensor, kleines Bildformat;
- komprimierte bzw. interpolierte Bilddaten als Ergebnis der Aufnahme etc.

Diese Aufzählung zeigt, dass nur eine der Aufnahmesituation angepasste, oft sogar bildvariante Simultankalibrierung brauchbare Auswertungen ermöglicht (LUHMANN & GODDING 2004). In jedem Fall ist es wichtig, automatische Kamerafunktionen zu deaktivieren und die Kamera sorgsam zu behandeln, wenn es auf die geometrische Genauigkeit ankommt.

Zu achten ist auch auf ausreichenden Speicherplatz auf den Speichermedien der Kamera, da die Original-Bilddaten möglichst nicht durch Komprimierung verändert werden sollen. Hier steht eine Vielzahl von Speichertypen zur Verfügung, wie SmartMedia, CompactFlash, MultiMedia und SecureDigital Karten, IBM Microdrive, Sony MemoryStick und xD card. Manche Kameras lassen nur einen oder wenige Speichertypen zu und beschränken unter Umständen auch die Speichergröße. Schädlich

aus photogrammetrischer Sicht sind Karten, die viel Wärme erzeugen, da dies die Geometrie des Sensors beeinflussen kann.

Digitale Profi-Systemkameras, wie z. B. die Kodak-Baureihe DCS 460/660/760 mit 6 Mio. Pixel, werden schon seit vielen Jahren erfolgreich in der Nahbereichsphotogrammetrie eingesetzt. Sie werden zurzeit abgelöst zum einen durch preiswertere Kameras gleicher Pixelzahl wie Canon EOS 10D, Fuji FinePix S2 Pro und Nikon D100. Zum anderen erscheinen hoch auflösende, relativ teure Kameras mit 11 bzw. 14 Mio. Bildpunkten auf dem Markt, deren CMOS Sensoren erstmals das volle Kleinbildformat abdecken (Canon EOS-1Ds, Kodak DCS Pro 14n). Eine Zusammenstellung der mit solchen Kameras erreichbaren Genauigkeiten findet sich in PEIPE & SCHNEIDER (2003).

Für Mittelformatkameras bietet sich die Nutzung von (teuren) digitalen Kamerarückteilen wie Kodak DCS ProBack (16 Mio. Pixel), Phase-One H25, Sinarback 54 und Leaf Valeo 22 (jeweils mit 22 Mio. Pixel) an. Untersuchungen zu solchen Kamerarückteil-Kombinationen liegen teilweise vor (LUHMANN & GODDING 2004).

5 Fazit und Trends

Der Fotomarkt boomt, die Pixelzahlen steigen, Kameras lösen sich in rascher Folge ab. Neueste Entwicklungen wie der „Four Thirds Standard“ zielen darauf ab, ein Optimum an Bildqualität durch komplette Neukonstruktion der bildgebenden Elemente, vor allem der Objektive zu verwirklichen. Bisher benutzte Objektive waren in der Regel für analoge Kameras konzipiert und konnten die Möglichkeiten hoch auflösender Sensoren nicht in höhere Bildqualität umsetzen.

Bedenkt man den großen Markt für Digitalkameras, so wird dies zu weiteren Entwicklungen und auch weiteren Kostensenkungen führen. CCD und CMOS Sensoren werden für die nächste Zeit nebeneinander existieren. Für photogrammetrische An-

wendungen steht eine Vielzahl geeigneter Kameras zur Verfügung. Um das Potenzial dieser Aufnahmesysteme nützen zu können, sind die Ansätze zur Beschreibung der inneren Orientierung der Kameras weiterzuentwickeln.

Literatur

- BEYER, H.A., 1999: Design and Performance of a Metrology Camera with 6 and 28 Million Pixel CCD-Sensors. – In: EL-HAKIM, S.F. & GRUEN, A. (Hrsg.): Videometrics VI. – SPIE, Vol. **3641**: 194–198.
- GSI, 2003: Kamera INCA3. – www.geodetic.com
- KIMMELMANN, R. & RAUSCHER, E., 2001: Durchblick gefragt. – F&M, **109** (4): Nachdruck (4 S.)
- LUHMANN, T. & GODDING, R., 2004: Messgenauigkeit und Kameramodellierung – Kernfragen der Industriephotogrammetrie. – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, **2004** (1).
- Mikrotron, 2003: Datenblatt Kamera MC1310/11. – www.mikrotron.de
- PEIPE, J., 1994: Zur Entwicklung der Aufnahmetechnik in der Nahbereichsphotogrammetrie seit 1980 – unter besonderer Berücksichtigung der Arbeiten von W. Wester-Ebbinghaus. – Wiss.-techn. Jahrestagung der DGPF, Publ. DGPF, Band **2**: 89–100, Berlin.
- PEIPE, J. & SCHNEIDER, C.-T., 2003: CCD oder CMOS – Ein Praxisbericht. – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, **2003** (5): 423–428.
- PEIPE, J. & STEPHANI, M., 2003: Untersuchungen zur Stabilität und metrischen Qualität einer digitalen 5 Megapixel Messkamera. – In: LUHMANN, T. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. – pp. 51–56, Wichmann Verlag, Heidelberg.
- WEINBERGER, 2003: Datenblatt Visario1500. – www.weinbergervision.com

Adresse des Autors:

Dipl.-Ing. JÜRGEN PEIPE
 Universität der Bundeswehr München
 D-85577 Neubiberg
 e-mail: j-k.peipe@unibw-muenchen.de

Manuskript eingereicht: November 2003
 Angenommen: November 2003