

PARADIGMENWECHSEL IN DER PHOTOGRAMMETRIE DURCH DIGITALE LUFTBILDAUFNAHME?

Michael Gruber¹⁾, Franz Leberl^{1) 2)}, Roland Perko²⁾
Graz, Österreich

ZUSAMMENFASSUNG

Wir beschreiben das neue digitale Großformat-Kamerasystem UltraCam-D als einen Beitrag zur Verdrängung des Luftbildfilmes. Wir behandeln die überzeugenden Vorteile digitaler Sensorik in der Luftbildmessung, welche sich durch das einfache Ersetzen von Film durch Pixelbilder ergibt. Aber dazu besteht ein interessanter, vielleicht der interessanteste Aspekt dieser neuen Technologie in einem „Paradigmenwechsel“, weg von der seit mehr als 100 Jahren angestrebten geringsten Anzahl von Filmbildern zur Erreichung eines geometrischen Genauigkeitszieles. Stattdessen wird die Nutzung einer beliebigen Redundanz von Bildern möglich, die zur Erhöhung der Robustheit von Verfahren, zur besseren Automatisierung und zur Steigerung der Genauigkeit führen wird.

Diese „Einladung zur Redundanz“ ergibt sich aus dem Wegfall aller Kosten für Film, Farbe, Filmverarbeitung und aus dem Verfall der Notwendigkeit, Bilder scannen zu müssen. Damit die Redundanz im photogrammetrischen Arbeitsprozess zur Wirkung kommen kann, müssen die photogrammetrischen Softwarepakete erweitert und die Arbeitsprozesse sehr viel mehr als bisher völlig digital werden. Film ist dann erstens wegen seiner Unwirtschaftlichkeit und kompromittierten Bildqualität als auch zweitens wegen seiner Redundanz-Behinderung nicht länger interessant.

ABSTRACT

We describe the UltraCam-D large format digital aerial camera system as a contribution to end the role of aerial film. We discuss the persuasive advantages of digital sensors, which result from replacing film by pixel arrays. But we also address the most interesting aspect of the new technology, representing a „paradigm shift“ away from the 100 years of minimizing the number of aerial images for a given accuracy goal. This will be replaced by the use of redundant images for the optimization of the robustness of procedures, the success of automation and the increase of geometric accuracy.

This invitation to acquire redundant data results from the lack of any costs for film, photo processing and scanning. However, to take full advantage of this redundancy the photogrammetric work flow must become totally digital and software must get enhanced to deal with this type of redundant data. Because of the economic disadvantage and the inability to provide this type of redundancy, the use of film in aerial photogrammetry may no longer be of interest.

1. EINLEITUNG

Wenige Verfahren der weitläufigen Gebiete der Informationsverarbeitung haben ihre analogen Wurzeln so vehement verteidigt wie die großformatige Luftbildaufnahme. Das ist einerseits verständlich, wenn deren hohe Qualität und das beeindruckende Format und der daraus resultierende Informationsinhalt beurteilt werden. Andererseits ist der analoge Film zum Anachronismus in einer nahezu vollständig digitalen, photogrammetrischen Verarbeitungskette geworden. Es gibt mehrere Gründe für diese konservative Haltung, allen voran die Tatsache, dass die analoge Aufnahmetechnologie gut eingeführt ist, der

Umgang mit analogem Film beherrscht wird und die Entwicklung kostengünstiger Kameras bisher nicht gelungen ist.

Digitale Luftbildkameras sind allerdings seit etwa dem Jahr 2000 ein ernstzunehmendes Diskussionsthema, als LH-Systems (heute Leica Geosystems) und Z/I Imaging ihre Digitalsysteme ADS-40 und DMC und Emerge eine kleinformatische 16 Mpixel grosse Luftbildkamera vorstellten. Zunächst verpuffte dies ohne Wirkung auf die Rolle des Luftbildfilmes in der photogrammetrischen Bildgebung und neue Filmkameras wurden in etwa derselben Rate verkauft wie zuvor. Es war auch kein Verfall der Preise für gebrauchte

¹⁾ Vexcel Imaging GmbH, Münzgrabenstraße 11, A-8010 Graz, Österreich, Tel (+43) (316) 84 90 66 0, mgruber@vexcel.co.at

²⁾ Institut für Maschinelles Sehen und Darstellen, Technische Universität Graz, A-8010 Graz, Österreich, Tel (+43) (316) 873-5011, leberl@icg.tu-graz.ac.at

Luftbildkameras festzustellen, die ab dann zu erwarten sind, wenn der Markt meint, dass nun Digitalkameras den Filmkameras den Rang ablaufen und alles Neue nur mehr digital sein werde.

Woran scheiterte bisher der Übergang zur Digitalsensorik in der Luftbildmessung? Das mag unter anderem an der Kleinheit des Photogrammetriemarktes liegen, der sich nur als „Trittbrettfahrer“ der allgemeinen Computerinnovationen erneuern kann, und dessen Innovationskraft daher durch enge Entwicklungs-Budgets begrenzt ist. Und es mag am Fehlen zündender neuer Ideen liegen, sodaß vorhandene Computerinnovationen nur ungenügend zur Wirkung gebracht werden, weil Anbieter in tradierten mechanisch-optischen Prinzipien und daher in hohen Kosten verhaftet bleiben.

Es gilt nun, ein Szenario zu entwerfen, das technisch und wirtschaftlich Vorteile beim Wechsel zur digitalen Luftbilddaufnahme beinhaltet. Der vorliegende Beitrag versucht, diese Vorteile zu orten und darüber hinaus neue Potentiale zu erkennen, die sich aus der digitalen Luftbilddaufnahme entwickeln lassen. Basis für die nachfolgenden Überlegungen ist das digitale Luftbilddaufnahmesystem UltraCamD, das von Vexcel Imaging Austria kürzlich vorgestellt wurde (Leberl u.a. 2003). Die Qualität der damit erstellten Bilddaten, die Einsatzkriterien für den Bildflug und die Wirtschaftlichkeit in der Anschaffung und im Betrieb werden mit anderen analogen und digitalen Systemen verglichen. Damit suchen wir klarzustellen, dass die Wirtschaftlichkeit konsequenter Digitaltechnik mit Qualitätssteigerungen der Ergebnisse konspiriert, um die weitere Nutzung von Luftbildfilm zu beenden.

Aber in der neuen Digitalsensorik steckt mehr Potential als nur ein Ersatz von Luftbildfilm, Fotolabor und Scanner. Wir argumentieren, dass die neue Digitalsensorik zu einer völlig veränderten Sichtweise der Begriffe „Robustheit“, „Automatisierung“ und „Genauigkeit“ führen wird. Damit bricht die Zeit an, in der alle analytischen und analogen Systeme stillgelegt und alle photogrammetrischen Verarbeitungsketten auf eine völlig digitale Produktion umgestellt werden. Die Hoffnungen, welche seit Jahrzehnten bei Bemühungen zur automatischen Bildauswertung enttäuscht wurden, haben nun die Chance auf Erfüllung.

Wir sprechen vom Verlassen der „Ideologie der Bildzahlminimierung“ in der Photogrammetrie und der Hinwendung zur

„Robustheitsmaximierung“ durch Redundanz in der Bildgebung. Zentrales Element der Kosten eines Photogrammetrie-Prozesses ist heute die Anzahl der zu verarbeitenden Film-Bilder und der Art des Filmes (Negativ vs. Positiv, Farbe vs. Schwarz-Weiss, Echt- vs. Falschfarben). Es gibt kaum ein Photogrammetrie-Unternehmen, welches wirklich konsequent auf automatische Verfahren setzt. Die analytischen Plotter sind noch immer in Verwendung, in jeder photogrammetrischen Abteilung wird Film stereoskopisch verarbeitet. Dies sollte durch neue Kameras verändert werden

Die neue Digitaltechnik der Luftbildkameras lädt ein, die Bildzahl als Faktor in der Photogrammetrie zu ignorieren. So wird der Aufwand nicht länger durch die Zahl der Bilder bestimmt, sondern ausschließlich durch den Erfolg automatischer Verfahren und damit der Vermeidung manueller Korrekturen beim Versagen automatischer Verfahren. Und hier spielt die Maximierung der Robustheit von Verfahren und der Erfolg der Automatisierung durch Nutzung von geeigneten Redundanzen in den Bilddaten eine große Rolle. Bilder werden kostenlos erzeugt und im automatischen Verfahren kostenlos bearbeitet. Kosten entstehen durch manuelle Eingriffe in den Datenfluss. Es gilt, diese Eingriffe zu minimieren und den Parameter „Bildanzahl“ frei zu geben.

2. DIGITALE BILDDATEN UND ANALOGER FILM

Eine wesentliche Grundlage für die vergleichende Bewertung von analoger und digitaler Luftbilddaufnahme bildet die Gegenüberstellung elektro-optisch generierter digitaler Bilddaten mit analogem Filmmaterial. Diese Bewertung kann nach geometrischen und radiometrischen Kriterien durchgeführt werden, wobei photogrammetrische Anforderungen an das Bildmaterial besonders zu berücksichtigen sind.

Ein Vergleich von Film und Digitalbild erfordert die Herstellung eines vergleichbaren Datenformates. Dies ist das Pixel, welches in der Digitalkamera auf natürliche Weise entsteht, aus dem Film aber erst durch einen Abtastvorgang erzeugt werden muss. In der Digitalkamera ist die Pixelgröße fest vorgegeben. Dies sind 9µm in der Bildebene der neuen UltraCam-D, welche durch die Objektivbrennweite und Flughöhe in eine eindeutige Bodenauflösung (Ground Sampling Distance GSD) umzurechnen ist. Anders im Film. Dieser hat einen festen Bildmaßstab, aber keine feste Pixelgröße und damit auch keine feste GSD. Pixelgröße entsteht durch die oft unbekümmerte Wahl des Abtastpixels, und von

einem und demselben Filmbild können Digitalversionen unterschiedlichster Pixelgrößen hergestellt werden. Es gilt also, nicht nur den Informationsverlust durch einen entsprechend hohen Qualitätsanspruch an den Abtastvorgang zu verhindern, sondern auch jene Abtastpixelgröße festzulegen, welche dem Filmbild gerecht wird.

Wir argumentieren, dass einem 23 cm breiten Filmbild eine digitale Pixelzeile mit 11.500 Elementen Paroli bietet, daß also in den 11.500 Digital-Pixeln mehr Information steckt als in der 23 cm breiten Filmzeile. Damit wäre dies ein äquivalentes Abtastpixel von 20 μm . Aber selbst bei 15 μm des Film-Abtastpixels enthält die Digitalzeile mit 11.500 Elementen mehr Information als die 15.000 gescannten Filmpixel. Diese überraschende Aussage wird im Folgenden belegt. In der Literatur bestehen hiezu Aussagen, welche den Zusammenhang zwischen radiometrischer Leistung und geometrischer Auflösung untersuchen (Chen et al., 2000).

2.1 Siemensstern

Wir berichten von einem Versuch mit einer genormten Auflösungsvorlage. **Abbildung 1** zeigt einen Siemensstern, der mit AGFA APX Film mittels Rolleimetric Kamera aufgenommen wurde. Das Filmbild wurde mit 10 μm , 15 μm und anderen Pixelgrößen abgetastet. In **Abbildung 1** führen diese Abtastungen mit 10 μm und 15 μm zu Pixelgrößen im Objekt, also zu einem Wert für die GSD in der Vorlage mit dem Siemensstern, von 0,34 mm und 0,51 mm. Das Digitalbild aus **Abbildung 1** hat eine GSD von 0,4 mm. Lassen wir nun ein Verfahren über diese Bilder laufen, welches den Grenzradius für den „kritischen Kreis“ berechnet, so erhalten wir für Film 9,0 mm (bei 10 μm Abtastung) und 9,5 mm (Abtastung mit 15 μm), aber mit der Digitalkamera wird ein Radius von 4,9 mm ermittelt. Der Zusammenhang zwischen Pixelgröße und kritischem Radius ist keinesfalls linear. Das Digitalbild löst besser auf, auch wenn der GSD-Wert gegenüber einem Filmbild größer ist.

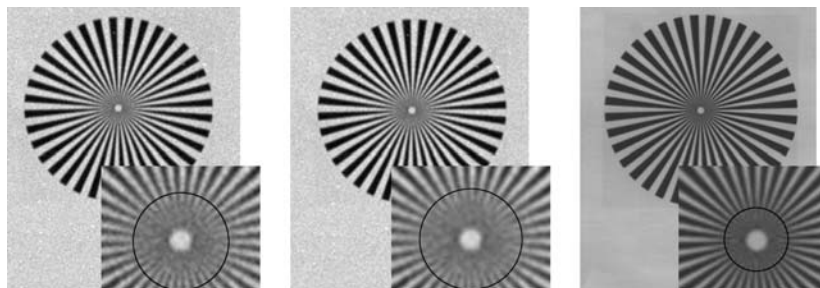


Abbildung 1: Film- und Digital-Aufnahmen eines Siemenssterns. Das Filmbild wurde mit 10 μm und 15 μm Pixels abgetastet (GSD von 0,34 und 0,51 mm). Das Digitalbild erzeugt Pixel mit 0,4 mm Seitenlänge im Objekt. Der kritische Kreisradius für die geometrisch aufgelösten Bildteile beträgt 9,0 und 9,5 mm für Film und 4,9 mm für das Digitalbild. Pixelgröße und geometrische Auflösung sind zwischen Film und Digitalsensor nicht linear vergleichbar, weil andere radiometrische Gegebenheiten bestehen.

Grund für diese hohe Leistung des Digitalbildes ist in erster Linie das Fehlen jeglichen Kornrauschens, das in **Abbildung 1** in der Einblendung sichtbar gemacht wird. Dieses Rauschen erzeugt im Filmbild eine künstliche Textur, welche im Objekt gar nicht besteht. Ein zweiter Vorteil des Digitalbildes ist der höhere Dichteumfang mit 12 Bits per Pixel versus den kaum 8 Bits/Filmpixel. Dieser zweite Vorteil kommt in einem Bild mit nur zwei Grauwerten, wie dies in **Abbildung 1** der Fall ist, nicht deutlich zur Geltung. Dazu sei ein Geländebild untersucht.

2.2 Luftbild

Das in **Abbildung 2** vorgestellte Detail einer Siedlung mit Wohnhäusern, Gartenanlagen und

Verkehrsflächen wurde im Abstand von wenigen Tagen im Sommer 2002 aufgenommen. Der Bildmaßstab ist in beiden Fällen ca. 1 : 12000, die Abtastung des analogen Filmmaterials wurde mit 2032 dpi (12,5 μm Pixelgröße) vorgenommen, die Auflösung am Boden beträgt in beiden Fällen ca. 15 cm. Auffällig ist die wesentlich bessere Detailzeichnung und die überlegene radiometrische Qualität der digitalen Aufnahme gegenüber dem analogen Material. Eingebildet in die Bildausschnitte sind Vergrößerungen um einen Faktor 2, um die Wirkung des Kornrauschens im Film und der besseren Radiometrie im digital aufgenommenen Bild zu verdeutlichen.



Abbildung 2: Analoge und digitale Luftbildaufnahmen im direkten Vergleich. Die analoge Aufnahme vom 6. Juli 2002 auf AGFA X100 Farbnegativfilm zeigt wesentlich weniger Details als die digitale Aufnahme vom 9. August 2002. Die Detailvergrößerung zeigt in beiden Fällen einen Bildkreis mit einem Durchmesser von 210 Pixel oder 31 Meter in 2-facher Vergrößerung.

2.3 Stereoskopie

Grundlage der stereoskopischen Datenerfassung ist der Vergleich von Bildinhalten. Mindestens zwei räumlich getrennten Aufnahmen eines Objektdetails werden dazu herangezogen. Basis für den Bildvergleich ist die Ähnlichkeit der beiden Bildausschnitte. Diese wird einerseits durch die unterschiedliche Perspektive, andererseits durch die Überlagerung der Bildinhalte durch Störsignale aus dem Aufnahmeverfahren reduziert. Eine wesentliche Beeinträchtigung der Qualität dieses Verfahrens wird beim analogen Film durch die Kornstruktur der entwickelten Emulsion hervorgerufen.

Ziel der stereoskopischen Auswertung ist die dreidimensionale Rekonstruktion der Objektform, wie die Auswertung von Details nach Lage und Höhe oder die weitgehend automatische Erstellung von

Oberflächenmodellen. Die Präzision eines einzelnen Messpunktes sowie die Datenausbeute in einem bestimmten Projektbereich sind die Qualitätskriterien für diese Datenerfassung. Besonders die Datenausbeute ist von der Bildqualität abhängig und kann in strukturarmen Regionen zu einer ungenügenden Messpunktdichte führen.

Zwei Probleme behindern die erfolgreiche automatische Erstellung von Digital Elevation Models DEM: erstens kommt es wiederholt zu Ausfällen wegen ungenügender Korrelation, sodass keine Höhenwerte berechnet werden konnten. Manuelle Eingriffe sind notwendig, um solche Geländestücke mit Daten zu füllen. Zweitens kommt es zu Ausreißern durch Fehlüberlagerungen (Mismatches), welche zum Teil manuell zu suchen und zu eliminieren sind.



Abbildung 3: Korrelationsergebnisse an einer schwach strukturierten Gebäudefassade (links) zeigen deutlich die Überlegenheit der digitalen Aufnahme. Das Filmbildpaar (Rolleimetric 6006, $c = 150$ mm, AGFA APX) wurde mit $20 \mu\text{m}$ Pixelgröße abgetastet, das digitale Bildpaar mit $c = 48$ mm und einer Pixelgröße von $12 \mu\text{m}$ aufgenommen. Die Streuungen in den Horizontalparallaxen bei 100 Messpunkten betragen etwa $1/3$ Pixel beim analogen Beispiel und $1/10$ Pixel.

Abbildungen 3 und 4 stellen die Korrelationsergebnisse von analogen und digitalen Bildpaaren gegenüber. Es wurde dabei je ein Oberflächenbereich mit sehr schwacher Struktur ausgewählt. Im Fall des Gebäudebildes wurde ein Raster von 100 Messpunkten durch Bildvergleich ermittelt. Die Korrelationskoeffizienten und die Anzahl der durch stereoskopische Betrachtung als fehlerhaft ermittelten Messpunkte werden als Merkmale für einen quantitativen Vergleich herangezogen.

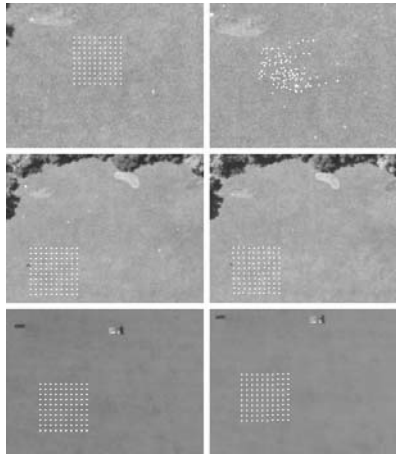


Abbildung 4: Korrelationsergebnisse in wenig strukturierten Geländebereichen. Analoge Luftbildaufnahmen (AGFA X100) werden einem digitalen Bildpaar gegenübergestellt. In jedem Fall beträgt der Bildmaßstab ca. 1 : 15.000. Die Korrelationsergebnisse führen im Falle der digitalen Aufnahme zu 2 bis 3-fach besseren Streuungswerten als im Falle der analogen Aufnahmen.

Abbildung 4 betrifft das Luftbildbeispiel. Die Abtastung mit $10\mu\text{m}$ führt zu einer grossen Zahl an Ausreißern, weil nicht Objektmerkmale, sondern zufällig angeordnete Filmkörnung zur Überlagerungsberechnung (Matching) herangezogen wird. Die Filmbilder aus Abbildung 4 wurden im Maßstab 1:15.000 erflogen. Eine Abtastung mit $10\mu\text{m}$ Pixeln führt zu einer GSD von 15 cm. Ohne diese Ausreißer ergibt sich aus $10\mu\text{m}$ Pixeln ein Rauschen der Parallaxenwerte im Objekt von ± 2 to ± 8 cm. Eine Abtastung mit $20\mu\text{m}$ Pixeln reduziert die Zahl der Ausreißer. GSD wird 30 cm. Und doch verringert sich das Rauschen auf ± 2 cm to ± 6 cm. Das Digitalbild wird mit einer GSD von 17 cm erfasst. Das Match-Rauschen ist dabei nur ± 1 cm bis ± 2 cm. Diese Genauigkeitsunterschiede sind auch durch die entsprechenden Korrelationsmasse r belegt. Bei $10\mu\text{m}$ Scans wird mit $r=0,29$ korreliert, mit $20\mu\text{m}$ erhöht sich dies auf $r=0,52$. Im Digitalbild wird es aber noch wesentlich höher, nämlich $r=0,81$.

Abbildung 5 fasst das Ergebnis einer terrestrischen Bildüberlagerung zusammen. Ein Bildpaar einer Gebäudegruppe auf Film und ein weiteres Bildpaar mit dem Digitalsensor UltraCam ergibt Abbildung 5 als Darstellung der Abweichungen des im 2. Bild gefundenen Matchpunktes vom Kernstrahl als Genauigkeitsmaß. Diese Abstände sind im Filmbild 2,5 mal größer als im Digitalbild.

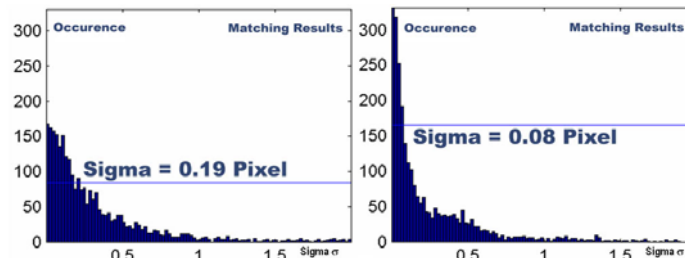


Abbildung 5: Die Abweichung vom Kernstrahl kann als Unsicherheit der Bildüberlagerung interpretiert werden. Im gescannten Filmbild ist diese Abweichung im gezeigten Beispiel mit 0,19 Pixel um einen Faktor 2,5 größer als im UltraCam-Digitalbild mit 0,08 Pixel.

2.4 Wirtschaftlichkeit

Die Einsparungen durch die digitale Luftbildaufnahme sind vielfältig. Tabelle 1 versucht die Darstellung einiger Einsparungen, wobei der Wegfall von Film- und Filmentwicklungskosten die offensichtlichste Einsparung verursacht, gefolgt von der Vermeidung jeglichen Aufwandes für die Filmabtastung. Ein Schlüssel der erhöhten Wirtschaftlichkeit ist die völlige Umstellung des photogrammetrischen Arbeitsflusses von den bisher üblichen hybriden Pixel/Film-

Kombinationen auf ein strikt digitales System. Erst damit können logistische Vereinfachungen in vollem Ausmaß realisiert werden. Denn dann entfällt die Filmlagerhaltung und der Umgang mit Filmkopien und gegebenenfalls die Erstellung von Filmvergrößerungen.

Tabelle 1: Einige der Faktoren der erhöhten Wirtschaftlichkeit digitaler Luftbildkameras. Die Finanzierung einer Digitalkamera wird mit weniger als 20.000 Luftbildern möglich. Die Abschreibung der Digitalkamera beruht auf einem mit der traditionellen Filmkamera vergleichbaren Anschaffungspreis.

Wegfall von Filmanschaffungen und Filmhalterhaltung
 Wegfall von Kosten für die Filmentwicklung
 Entfall der Filmabtastung
 Gleichzeitige Erstellung von panchromatischen, Farb- und Falschfarbbildern
 Erhöhte Bilderfassungskapazität pro Bildflug
 Qualitätskontrolle in Echtzeit im Flug erspart kostspielige Flugwiederholung
 Entfall des Filmarchivs und Ersetzen mittels digitaler Bilddatenbank
 Entfall aller Kopierarbeiten
 Vermehrung der Anzahl Flugtage durch erhöhte Radiometrieleistung
 Verringerung manueller Eingriffe in die Aerotriangulierung durch verbesserte Bildüberlagerung
 Verringerung manueller Eingriffe zur Korrektur von Fehlern in Höhenmodellen
 Erhöhung des Durchsatzes bei Vegetationskartierungen durch Bildklassifizierung mit 5 Spektralkanälen (R, G, B, NIR, panchromatisch)

3. ULTRACAM_D, DIE DIGITALE GROSSFORMATKAMERA

3.1 Die Kamera

Abbildung 6 zeigt das gesamte System der UltraCam-D mit dem Sensor SU, der Speicher-

und Proessoreinheit SCU und der Konsole für das interaktive Management des Systems im Flug. **Tabelle 2** fasst die Spezifikationen des Systems zusammen. **Abbildung 7** zeigt eine Ansicht der Sensoreinheit mit ihren 8 Objektiven.



Abbildung 6: Das UltraCam-D System mit Sensor SU, Speicher und Computereinheit SCU und der Konsole für die Steuerung.

Tabelle 2: Einige wesentliche Spezifikationen der UltraCam-D. Das System ist mit einer Stromversorgung von 850 Watt zu versehen.

Sensor Einheit SU

Panchromatisches Bildformat	11500 * 7500 Pixel @ 9 µm, 103.5 mm * 67.5 mm
Objektivbrennweite and Apertur	100 mm, f 1/5.6
Gesichtsfeld in Flugrichtung und quer dazu	55° / 37°
Multi-Spektral (RGB, NIR)	4,008 * 2,672 Pixel, @ 9 µm
Verschluss in Sekunden	1/500 – 1/60
Bewegungskompensation mittels FMC	TDI Steuerung
Bildwiederholrate	bis zu 1.3 Bilder pro Sekunde
Radiometrische Auflösung	> 12 bit
Dimensionen	45 cm * 45 cm * 60 cm
Gewicht	< 30 kg

Speicher und Rechereinheit (Storage & Computing, SCU)

Speichervolumen	> 1 TB
Unkomprimierte Bilder, mit Doppelaufzeichnung für Datensicherheit	> 1850 Bilder
Dimensionen	55 cm * 40 cm * 65 cm
Gewicht	< 35 kg



Abbildung 7: Ansicht der Sensoreinheit von unten. Im Sensor befinden sich 8 Objektive, davon dienen 4 für die panchromatische Aufnahme, 4 für die Aufnahme der 4 Farbkanäle rot, grün, blau und infrarot. Jedes Objektiv hat dasselbe Gesichtsfeld. In der Bildebene sind die Flächenarrays angebracht. Der panchromatische Konus mit 4 CCDs dient als „Masterkonus“ zur Festlegung des Bildkoordinatensystems.

Die Befliegung mit UltraCam-D unterscheidet sich nicht von einer Befliegung mit einer Traditionsfilmkamera. Es ist dieselbe Zahl von Fluglinien zu befliegen. Wird etwa ein Gebiet von 10 km x 10 km im Maßstab 1:10.000 befliegen, so ergeben sich im Film- und Digitalfall dieselben 6 Flugstreifen mit einer Breite von 2,3 km (= 23 cm Bildformat mal Maßstab). Das Ergebnis besteht allerdings wegen des Bildformates entlang der Flugrichtung im traditionellen Fall bei 60% Vorwärtsüberlappung aus 72 Bildern, im Digitalfall aus 108 Bildern. Auf das Thema der Beliebigkeit der Vorwärtsüberlappungen wird in einem gesonderten Abschnitt eingegangen.

3.3 Zum Datenfluss

Die Speicher und Rechereinheit SCU kann die Bilder verarbeiten. In der SCU befinden sich 15 CPUs und 28 Platten. **Abbildung 8** zeigt schematisch die Optionen für die Bildverarbeitung. Es bestehen im Datenfluss einige unterschiedliche „Levels“ bei den Bildprodukten, nämlich

3.2 Zur Befliegung

- | | |
|----------|--|
| Level 00 | 14-bit Rohdaten mit Doppelspeicherung zur Datensicherheit |
| Level 0 | 14-bit Rohdaten, verifiziert, keine Doppelabspeicherung notwendig |
| Level 1 | Radiometrisch korrigiert und für schnellere Bearbeitung umsortiert |
| Level 2 | Geometrisch korrigiert und zusammengefügt, Farbe gesondert gespeichert |
| Level 3 | Farbe ist in das Großformat interpoliert, das Farbbild-Endergebnis besteht |

Im Flug schon kann die Verarbeitung der Rohdaten in die höherwertigen Levels beginnen, nach der Landung kann die Berechnung an Bord des Bildflugzeuges fortgesetzt werden. Es

kann aber auch die SCU aus dem Flugzeug genommen und die weitere Verarbeitung im Büro fortgesetzt werden.

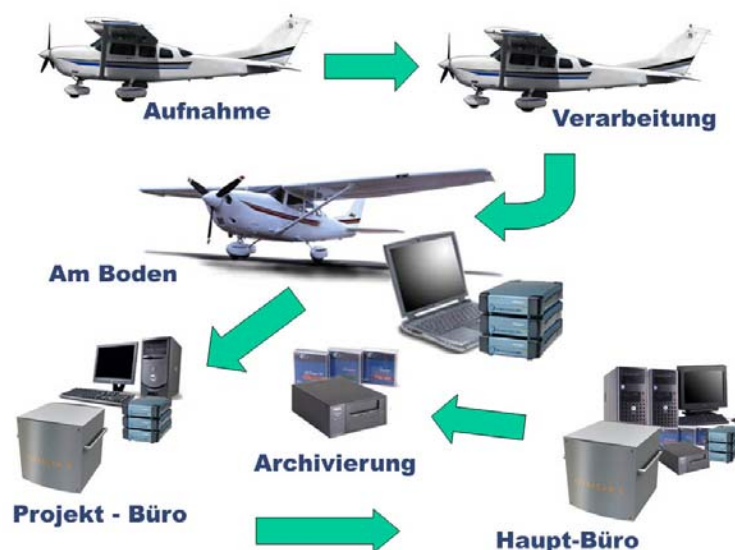


Abbildung 8: UltraCam - Datenflußkonzept. Die im Flug erzeugten Bilddaten werden redundant gespeichert. Die Nachbearbeitung erfolgt je nach den örtlichen Voraussetzungen im Flugzeug, im Hangar oder im Büro. Der physikalische Transfer der Bilddaten kann in jeder Phase der Bildnachbearbeitung erfolgen.

4. VERWALTUNG UND ARCHIVIERUNG DIGITALER LUFTBILDER

Die 100 Jahre „Film in der Photogrammetrie“ führen beim Übergang auf rein digitale Daten sicherlich zu „Entzugserscheinungen“ der Anwender. Das Fehlen der analogen Bilddaten nach einer erfolgreichen digitalen Aufnahme wird von Manchen als Nachteil bezeichnet. Nicht selten werden als Argumente für den Film Datensicherheit und einfachere Handhabung angeführt. Diese Haltung wird wohl im Hinblick auf den bargeldlosen Zahlungsverkehr, die durchwegs digitale Fernerkundung, die papierlose GIS-Welt und viele andere digitale Realitäten als konservativer Anachronismus gesehen werden müssen. Interessanterweise findet man in heutigen Photogrammetriebetrieben eine hybride Mischung aus Filmverarbeitung und digitalen Verfahren. Analytische Auswertegeräte sind verbreitet im Einsatz, die Digitalverfahren sind weitgehend auf die Orthophotoherstellung beschränkt. Das Bildspeicherformat ist nach wie vor auf Film beschränkt. Digitale Daten werden oft nur als Zwischenergebnis gesehen und daher nach der Verwendung nur halbherzig konserviert.

Die Digitalkamera ermöglicht das Bekenntnis zum völlig digitalen Daten- und Arbeitsfluss. Es gilt hier also, den Anwender durch geeignete Werkzeuge zu unterstützen. In Analogie zur Satellitenfernerkundung ist eine geografisch orientierte Bilddatenbank bereitzustellen.

Im Laufe eines Jahres erfliegen größere Photogrammetrieunternehmen etwa 20.000 Luftbilder pro Aufnahmesystem. Diese 20.000 Bilder belegen einen Speicheraufwand von 8 TeraBytes, wenn ein Einzelbild 400 Mbytes umfasst. Das sind nunmehr keine abschreckenden Datenmengen mehr. Wenn aber 20.000 Bilder pro Jahr zu verwalten, wieder zu finden, in Stereopaaren oder Bildverbänden gegliedert werden müssen, dann ist dies nur mittels einer Bilddatenbank sinnvoll möglich. Dazu entwickeln wir auf Basis der Satellitenbilddatenbank „*EarthFinder*“ das System „*Earth Finder-Aerial*“. Diese Datenbank enthält die Flugplanung jeder Befliegung, die Metadaten zu jedem Bildflug, zu jedem Bildverband und Bild. Sie enthält jedes Bild sowohl in voller geometrischer Auflösung als auch als Quickview zur schnellen visuellen Prüfung. Und sie beinhaltet eine Indexmap jedes Bildverbandes aus zusammengefügt Quickviews zur Übersicht über jeden Bildblock.

Bilddatenbanken müssen mit den heute bestehenden Datenbanken korrespondieren.

Diese gibt es meist nur für Metadaten. Weiters sind sie so anzulegen, dass die Datenrechte des Bildeigentümers geschützt bleiben, und es ist selbstverständlich ein Internetzugang vorzusehen. Änderungen im Bestand sind rechtlich und administrativ gesichert zu organisieren. Die Eintragung von Daten ist getrennt von der Nutzung des Datenbestandes zu sehen.

5. MÖGLICHKEITEN DER REDUNDANZ-NUTZUNG ALS PARADIGMENWECHSEL

Wir treten in die spekulative Betrachtung eines Paradigmenwandels in der Photogrammetrie ein. Noch gibt es dazu keine gesicherten Untersuchungen, weil es ja bisher keine Digitalkameras gab, welche diese Ansätze realistisch erscheinen lassen. Das ändert sich aber. Im Folgenden versuchen wir, die Erwartung eines Paradigmenwandels zu begründen, sodass daraus für Entwicklungen in photogrammetrischer Software Anregungen und Denkanstöße entstehen.

5.1 Bisher: Minimierung der Bildanzahl

Die Photogrammetrie entstand, um die bis dahin ausschließlich terrestrische Vermessung günstiger zu erledigen und Kosten zu sparen. So hatte sie von Anbeginn das Ziel, mit einer Minimalzahl an Luftbildern auszukommen, um ein gegebenes Genauigkeitsziel zu erreichen. Alle Handhabungen waren selbstverständlich manuell, der Projektaufwand war eine oft lineare Funktion der Zahl der betroffenen Luftbilder, zum Teil auch eine Funktion der Fläche des zu vermessenden Gebietes. Es ist daher nicht verwunderlich, dass auch heute das Ziel besteht, die Zahl der Luftbilder für ein Projekt zu minimieren.

Analoge Luftbilder wurden seit jeher in einem standardisierten Muster an Fluglinien und in einem kaum veränderten Raster aufgenommen. Neben dem Bildmaßstab, der von der Projektanforderung abhängt, sind Längsüberdeckung mit 60% und Querüberdeckung mit 20% die tonangebenden Parameter, die als nahezu unveränderliche Kenngrößen in der photogrammetrischen Luftbildaufnahme ihren festen Platz einnehmen. Grund dafür ist das Ziel, mit der minimalen Bildanzahl die Kosten für Film, Entwicklung, Handhabung, Abtastung und Auswertung für eine vorgegebene Projektfläche niedrig zu halten.

5.2 Von nun an: Optimierung des Projektergebnisses bei freier Bildzahl

Die digitale Luftbildaufnahme kennt keine Kosten für Film, Entwicklung, Handhabung und Abtastung. Damit verfallen tradierte Planungsmuster. Das Paradigma der minimalen Bildanzahl kann durch ein neues Paradigma ersetzt werden, in welchem die Bildanzahl kein Faktor mehr ist. Statt dessen können neue Faktoren eines Photogrammetrieprojektes in den Vordergrund rücken, etwa

- die Minimierung des manuellen Beitrages,
- die Optimierung des manuellen Auswertbeitrages,
- die Maximierung der Robustheit und Sicherheit des Ergebnisses,
- die Maximierung der geometrischen Genauigkeit

Bildfolgen mit 80%, 90%, 95% oder mehr Längsüberdeckung sind möglich, ohne wesentliche Zusatzkosten zu verursachen, vorausgesetzt, dass die Verarbeitungskette weitgehend automatisiert abläuft. Es ist einfach zu sehen, dass im Digitalfall eine Flächenkamera ähnlich wie eine Zeilenkamera betrieben werden kann, sodass Bilder in hoher Frequenz neu aufgenommen werden. Das Ergebnis wäre einer Zeilenkamera nicht gänzlich unähnlich, welche mit vielen Einzelzeilen in der Bildebene ausgestattet wird und damit eine hohe Redundanz erzielt, wobei aber der Geometrievorteil bei der Flächenkamera liegt.

5.3 Hochredundante Aerotriangulation

Welche Sorgen haben bisher die breite Akzeptanz der vollautomatischen Aerotriangulation behindert? Es ist wohl die Sorge über die Notwendigkeit manueller Eingriffe, welche den Vorteil der Automatisierung zunichte machen kann.

Sollte eine Längsüberlappung von 90% erzielt werden, so liegt jeder Geländepunkt auf 10 einander recht ähnlichen Bildern. Bei 95% steigert sich dies auf 20 Bilder. Solche benachbarte Bilder würden wegen des geringen geometrischen Unterschiedes sehr hohe Korrelationswerte bei der Bildüberlagerung und daher sehr hohe Sicherheit liefern. Analog den Verfahren der Auswertung von hochredundanten Bildstreifen aus Videokameras, etwa durch Pollefeys (2002), können sehr viele Verknüpfungspunkte vollautomatisch ermittelt und in die Blockausgleichung eingebracht werden. Streifen sehr hoher geometrischer Robustheit und Steifheit werden möglich, wie dies in Film-basierten Verfahren nicht denkbar ist. Dies wiederum kann sich auf die Art auswirken, in welcher Verfahren der Direktmessung der

Elemente der äußeren Orientierung eingesetzt werden. Die Genauigkeit ist vermutlich durch die Faktoren „Zahl der Verknüpfungspunkte“, „Zahl der beteiligten Bilder“ und „Geometrie der äußeren Orientierung“ bestimmt.

Notwendig wird sein, dass heutige Programmsysteme zur automatischen Messung von Bildpunkten in Bildverbänden und die entsprechenden Blockausgleichungssysteme mit den hoch überlappenden Bildverbänden keine Schwierigkeiten haben.

5.4 Hochredundante DEM-Erstellung

Laserscanner beweisen den Wert eines digitalen Höhenmodells (DEM), welches ohne wesentliche manuelle Arbeiten erzeugen werden kann. In Verbindung mit der Direktmessung der äußeren Orientierung der Trägerplattform ergibt sich eine nahezu vollautomatische DEM-Erstellung. Benachbarte Aufnahmestreifen müssen wohl aneinander angepasst werden, aber im Vergleich zur herkömmlichen manuellen Photogrammetrie mit der Bearbeitung vieler Filmbilder scheint ein Laserscanner ein hoch automatisches System zu sein.

Wie wird sich dies im Hinblick auf Digitalkameras und Redundanznutzung ändern? Es ist anzunehmen, dass die hohe Längsüberdeckung mit 90% oder mehr und daher mit 10 bis 20 Bildern pro Objektpunkt ein wesentlich besseres Höhenmodell verspricht als dies bisher mit nur 2 Bildern möglich war. Und es gilt nicht mehr wie bisher, mit einer großen Zahl von Luftbildern die Orientierungsparameter durch Triangulierung zu berechnen und dann kaum überbestimmte Stereoermittlungen durchzuführen.

Stattdessen folgt auf die vollautomatische hochredundante Aerotriangulation die DEM-Bildkorrelation mit wesentlich robusteren Korrelationswerten. Denn es sind die Perspektivunterschiede benachbarter Bilder weit geringer als bisher, daher treten Korrelationsversager und Falschkorrelationen weit weniger oft auf, sichttote Räume reduzieren sich auf jene, die es auch im Laserscanning gibt und durch die Verwendung von mehr als 2 Projektionsstrahlen im Sinne des „Multi-Ray-Matching“ resultiert ein sehr robustes und genaues Höhenmodell aus voll automatischen Verfahren. Manuelle Korrekturen sind kaum noch zu erwarten. Um diese DEMs in der Tat zu erzeugen, ist sicherzustellen, dass DEMs mit Verfahren des Multiray-Matching realisierbar sind.

Wird dies die Rolle des Laser-Scanners in der topographischen Vermessung beeinträchtigen können?

5.5 Hochredundante Gebäudeerfassung

Der Übergang vom 2D GIS zum 3D Stadtmodell im Sinne der Cybercities (Baltsavias et al, 2000) wird heftig überlegt. Es gibt dazu kein technisches Hindernis, denn 3D Objektrekonstruktionen sind seit 100 Jahren das Tagesgeschäft der Photogrammetrie. Wohl scheitert die flächenmäßige Realisierung von städtischen 3D GIS an den Kosten der manuellen Arbeit. Die automatische Erfassung der Dachlandschaften, der Vegetationsbestände getrennt von den Gebäuden, des DEMs der kahlen Erde ist notwendig. Dazu sind Verfahren zu realisieren, die nicht an der mangelnden Überbestimmung durch die klassische Bildminimierung scheitern müssen.

Erfolgreiche Systeme zur Erstellung von Gebäudemodellen klassifizieren die Vegetation und trennen sie von den anderen vertikalen Objekten der Erdoberfläche. Dazu sind Verdeckungen und sichttote Räume so gering wie möglich zu halten. Weiters sind Dachformen durch Analyse des rohen DEM und der Bildsegmente zu erfassen. Das verspricht eine gewichtige Verbesserung durch die simultane Erfassung von Farb- und Falschfarbbildern, als auch durch hohe Längsüberdeckungen aus einer Digitalkamera.

Entsprechende Softwaresysteme mögen heute noch nicht bestehen. Sie sind in Verbindung mit einer digitalen Luftbildkamera aber sehr sinnvoll.

5.6 Manuelle Bildbearbeitung hochredundanter Bildstapel

Die Digitalbilder haben 12 Bit per Farbkanal mit bis zu 4000 Grauwerten. Die manuelle Bearbeitung muss auf herkömmlichen Monitoren erfolgen, die meist nicht mehr als 200 unterschiedliche Grauwerte darstellen können (<8 Bit). Es gilt, erstens aus 12-Bit-Bildern zur visuellen Darstellung 8-Bit-Bilder zu erzeugen, und es sind aus den hochredundanten Bildstapeln für die Betrachtung mit nur 2 Augen Paare auszuwählen.

Die erste Aufgabe kann durch eine so genannte „Rekonstruktion“ gelöst werden. Es wird aus einem gegebenen 12-Bit-Digitalbild mit 11,500 x 7,500 Pixeln ein neues 8-Bit-Bild erzeugt, welches aber 23,000 x 15,000 Pixel beinhaltet. Die Verdoppelung der Anzahl Pixel für die visuelle Darstellung entspricht der Erfahrung mit dem Unterschied zwischen gescannten 8-Bit-Filmbildern und digital erfassten 12-Bit-Bildern.

Die zweite Aufgabe muss aus dem Bildstreifen mit vielen Bildern jedes Geländepunktes jene zwei auswählen, welche einen Geländepunkt optimal erfassen. Das sind die außen liegenden Bildpaare, welche einer Längsüberdeckung mit 60% entsprechen. Sollte man manuell gewisse Punkte und Objekte markieren, so wären diese Markierungen in den vollen Bildstapel einzubringen, um die 3D Koordinaten mit einem automatischen Multi-Ray-Matching unter Nutzung aller dazwischen liegenden Bilder festzulegen. Es ist anzunehmen, dass die manuelle Messung immer durch diese Mehrstrahlenbeobachtung ersetzt werden wird.

Geeignete Rekonstruktionsverfahren zur optimalen Darstellung von 12 (in Farbe 36-) Bit Bildern auf einem Stereobildschirm mit nur 8 Bit pro Farbkanal sind bereitzustellen. Die Erweiterung der manuellen Messung im Stereobildpaar um die „unsichtbaren“ dazwischen liegenden und redundanten Bilder ist softwaremäßig zu realisieren.

6. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Wir haben durch den Vergleich von analogen und digitalen Luftbilddaten angedeutet, dass eine Digitalkamera mit 11.500 x 7.500 Pixeln einer herkömmlichen Filmkamera überlegen ist. Es wurde auch gezeigt, dass die Vorteile der digitalen Aufnahmetechnologie dem Überleben des Luftbildfilmes enge Grenzen setzen. Zunächst ist zu erwarten, dass wirtschaftliche Vorteile durch die Einsparung von Verbrauchsmaterial und das Wegfallen des Aufwands für die Digitalisierung der analogen Bilder als Killerargument den Übergang zur Digitalsensorik begründen können. Denn mit nur 20.000 neuen Luftbildern ist eine Digitalkamera des Typs UltraCamD zur Gänze, inklusive der Betriebskosten und Wartung, zu finanzieren.

Die radiometrischen und geometrischen Vorteile als auch die Überlegungen zum Datenfluß sind gern gesehene zusätzliche Argumente, die sich auch im Wesentlichen auf die Wirtschaftlichkeit auswirken. Aber es gibt noch eine sehr interessante und weiterführende Überlegung, jene des Paradigmenwechsels.

Ein noch ungenütztes und nicht diskutiertes Vorteil der digitalen Luftbilddaufnahme liegt im Automatisierungspotential, das durch geänderte Befliegungsparameter und eine damit verbundene neue Aufnahmestrategie ausgeschöpft werden kann. Es geht um die einfache Möglichkeit, jeden Geländepunkt auf mehr als die herkömmlichen 2 Bilder aufzunehmen. Ohne Kosten sind 10, 20 und mehr Bilder pro Geländepunkt erfassbar. Dies

resultiert aus der Möglichkeit, sehr hohe Längsüberlappungen vorzusehen, denn die vorgestellte Filmkamera kann Bilder im Takt von nur 0,75 Sekunden erzeugen. Damit sollte es möglich werden, eine vollautomatische Aerotrignagulierung ohne weitere manuelle Eingriffe zu rechnen, DEMs hoher Genauigkeit auch ohne wesentliche manuelle Eingriffe zu erfassen und auch andere Aufgaben der automatischen Bildanalyse in robuster Weise zu lösen.

LITERATUR

Baltsavias M., A. Grün, L. van Gool, eds. (2001) Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (III), A.A. Balkema Publishers, Lisse, The Netherlands, 415 p.

Chen T., P. Catrysse, A. Gamal, B. Wandell (2000) *How Small Should Pixel Size Be?* Information Systems Lab., Stanford University, www-isl.stanford.edu/~abbas/group/papers_and_pub/pixelsize.pdf.

Leberl F., M. Gruber, M. Ponticelli, S. Bernoegger, R. Perko (2003) *The UltraCam Large Format Aerial Digital Camera System*.

Proceedings of the ASPRS Annual Convention, Anchorage USA (CD only).

Leberl F., R. Perko, M. Gruber, M. Ponticelli (2002). *Novel Concepts for Aerial Digital Cameras*. Proceedings of the ISPRS Commission I Symposium, Denver, USA. ISPRS Archives, Volume 34, Part 1. Available from GITC bv, Lemmer The Netherlands (CD only).

Leberl F., M. Gruber (2002) *Color in Photogrammetric Remote Sensing*. ISPRS Commission VII Symposium in Hyderabad, India. Archives of the ISPRS, Vol. XXXIV, Part 7, available from GITC bv, Lemmer, The Netherlands, pp. 59-64.

Perko R., M. Gruber (2002) Comparison of Quality and Information Content of Digital and Film Images. ISPRS Commission III Symposium in Graz, Austria. Archives of the ISPRS, Vol. XXXIV, Part 3B, available from GITC bv, Lemmer, The Netherlands, pp. B206-B209.

Pollefeys M., L. van Gool, M. Vergauwen, K. Cornelis, F. Verbiest, J. Tops (2002) *Video-to-3D*. ISPRS Commission III Symposium in Graz, Austria. Archives of the ISPRS, Vol. XXXIV, Part 3A, available from GITC bv, Lemmer, The Netherlands, pp. A-252-A257