



## **Digitale Photogrammetrische Systeme im Einsatz: Erfahrungen am Institut Cartogràfic de Catalunya**

ISMAEL COLOMINA und JOSEP LLUÍS COLOMER,  
Barcelona/Spanien

### **Zusammenfassung**

Seit seiner Gründung im Jahre 1982 hat das Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC) digitale Systeme im Fernerkundungssektor entwickelt und seit 1987 auch digitale photogrammetrische Systeme zur Orthophotoproduktion. Die Erfahrungen, die während der Entwicklung und Anwendung dieser Systeme gewonnen wurden, haben die Einführung kommerziell erhältlicher Systeme vereinfacht. Letztere sind heute am ICC im täglichen Einsatz. Der vorliegende Artikel beschreibt die Erfahrungen des ICC in den Bereichen Scannen, Bildkompression, Orthophotoproduktion, Stereoauswertung und Bildzuordnung für den DGM-Aufbau.

### **Digital photogrammetric systems at work: the ICC experience**

Since its foundation in 1982 the ICC has developed digital systems for remote sensing and since 1987 digital photogrammetric systems for orthophoto production. The expertise in developing and exploiting digital systems has facilitated the introduction of commercially available digital photogrammetric systems which are now in full operation. The paper describes the ICC experience in scanning, image compression, orthophoto production, stereoplotting, and image matching for DEM generation.

### **1. Einleitung**

Das Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC) ist die Landesvermessungsbehörde des autonomen Landes Katalonien. Obwohl produktionsorientiert, hat es eine Forschungs- und Entwicklungsstruktur, um schnell auf wissenschaftliche und technologische Innovationen reagieren zu können. Die digitale Photogrammetrie ist ein Beispiel dafür, wie eine existierende technische Infrastruktur und fachliche Kompetenz in Photogrammetrie und Fernerkundung für die problemlose Einführung einer neuen Technologie genutzt werden.

Der Weg zur digitalen Photogrammetrie wurde bereits vor geraumer Zeit gebahnt, als J. L. COLOMER 1977 die Entwicklung von Fernerkundungssoftware für die Prozessierung von Landsat-Bildern an der Technischen Universität von Katalonien (UPC) einleitete. Zu dieser Zeit war das primäre Ziel die Extraktion thematischen Inhalts für die Landnutzungsanalyse. Obwohl anfänglich keine Software zur Geocodierung verfügbar war, hatte das Projekt den Vorteil, das Team mit digitalen Bildern und digitaler Bildverarbeitung vertraut zu machen. 1980 wurden der Software Module zur Geocodierung hinzugefügt. 1981 wechselte das Entwicklerteam von der Universität an das ICC,

und 1985 wurde die erste Kartenserie aus Satellitenbildern abgeleitet; sie basierte auf den Falschfarben-Orthobildern des Landsat-5 Satelliten. Daher waren sowohl das Produktions- als auch Entwicklerteam vorbereitet, mit digitalen Bildern zu arbeiten, als man sich der Herstellung digitaler Orthophotos zuwandte. Erste Experimente mit digitalen Orthophotos wurden 1986 gemacht, und das erste operationelle System nahm die Produktion 1988 auf. Im Laufe der Jahre wurden digitale photogrammetrische Methoden auf immer vielfältigere digitale Sensoren bzw. Bilddaten angewendet, einschließlich SPOT, ERS-1, geocodierter und interferometrischer Daten zur DGM-Herstellung und CASI-flugzeuggetragener Multispektralscannerdaten.

Heute werden am ICC die Orthobildherstellung aus Luft- und Satellitenbildern sowie das Mono- und Stereoplotting mit digitalen Mitteln durchgeführt (siehe auch J. L. COLOMER, I. COLOMINA; 1994).

### **2. Innovationen in Photogrammetrie und Fernerkundung**

Photogrammetrie und Fernerkundung waren lange Zeit verwandte, aber weitgehend unabhängige Fachrichtungen. Bis vor kurzem wurde

die Erfassung geometrisch hochgenauer Daten für die Herstellung topographischer Karten in mittleren und großen Maßstäben aus photographischen Meßbildern als die Domäne der Photogrammetrie angesehen. Im Gegensatz dazu stellte die Fernerkundung weniger genaue Daten für kleinere Maßstäbe mit Hilfe digitaler Sensoren bereit. Im letzten Jahrzehnt haben technologische Veränderungen jedoch dazu geführt, daß flugzeuggetragene Fernerkundung und Satellitenphotogrammetrie keine seltenen Ausnahmen mehr sind. Gleichzeitig hat die zunehmende Verfügbarkeit von Computern und modernen Arbeitsmethoden zu einer Erhöhung der Anforderungen aus verschiedenen Anwendungsgebieten geführt. Zu diesen Gebieten gehören unter anderem der Umweltschutz und Evaluierung von Naturkatastrophen. Die entsprechende Nachfrage nach neuen photogrammetrischen und Fernerkundungsprodukten stellt häufig neue Anforderungen an die Produktherstellung. Einige Anwendungen der flugzeuggetragenen Fernerkundung erfordern exakte photogrammetrische bzw. geometrische Modelle. In anderen Anwendungen kann die radiometrische Genauigkeit wichtiger sein als die geometrische oder eine schnelle Auslieferung kann produktentscheidend sein. Schließlich kann es auch ein hybrides photogrammetrisches und Fernerkundungsprodukt sein, das die Anwenderwünsche am besten befriedigt. Entsprechende Beispiele sind die Nachfrage nach flugzeuggetragenen Multispektralscannerdaten oder analogen, kleinmaßstäbigen Satellitenbildern.

Der Schlüssel zu einer rationellen Nutzung von Flugzeug- und Satellitendaten ist die Entwicklung einer Vorgehensweise, die sowohl den „photogrammetrischen“ als auch den „fernerkundlichen“ Standpunkt verkörpert und zu einer Synthese führt. Daher ist es erforderlich, eine Anzahl von komplementären, überlappenden, ähnlichen oder identischen Aufgaben und Konzepten in einem gemeinsamen Rahmen zusammenzufassen. Diese Synthese kann nur mit Hilfe eines digitalen Systems verwirklicht werden. Hierbei ist zu beachten, daß jeder Arbeitsablauf zur Bildauswertung aus drei wesentlichen Schritten besteht: der Datenerfassung, der Sensororientierung und Bildnormalisierung so-

wie der Bildinterpretation. Langfristig müssen sowohl die Struktur einer Organisation als auch die entsprechende Personaleinteilung mit diesem Konzept übereinstimmen.

### 3. Datenerfassung

Die Datenerfassung umfaßt sowohl die Aufnahme von Luft- und Satellitenbildern in analoger oder digitaler Form als auch die Beobachtung zusätzlicher Parameter zur Sensororientierung; sie schließt auch die Filmentwicklung und die Digitalisierung der Aufnahmen mit ein. Datenerfassungsaufgaben sind heute zunehmend komplex und entscheidend für den Erfolg eines Projekts: Moderne Meßkameras werden von Computersystemen gesteuert, flugzeuggetragene digitale Sensoren mit speziellen Kalibrierungs- und Operationsprozeduren sind bereits verfügbar, Systeme zur Positions- und Orientierungsbestimmung müssen zusätzlich in das Sensorsystem integriert und parallel betrieben werden, computergestützte Flugplanung und Navigation ist heute dank GPS weitverbreitet. Ähnliche Betrachtungen gelten hinsichtlich der Komplexität der Bilddigitalisierung.

Die neu einzurichtenden Datenerfassungsabteilungen werden daher hochqualifiziertes technisches Personal benötigen. Die Auswertung von Satellitenbildern ist ein wohlbekanntes Gebiet und soll deshalb hier nicht diskutiert werden. Es sei lediglich erwähnt, daß das ICC Satellitenbilddaten seit seiner Gründung im Jahre 1982 auswertet.

Die Erfassung von digitalen Bildern vom Flugzeug aus wurde am ICC kürzlich begonnen. Seit Anfang 1994 besitzt das ICC ein CASI System. Der CASI (Compact Airborne Spectrometer Imager) ist ein Pushbroom-Spektrometer mit einem Sensitivitätsbereich zwischen 430 und 870 nm. Die Bildaufnahme erfolgt mittels einer CCD-Matrix mit 512 zeilenförmig angeordneten Pixeln und 288 Spektralkanälen; ihre drei Betriebsmodi sind der räumliche, der Spektral- und der Full-Frame (Hyperspektral-)Modus. In der augenblicklichen Konfiguration ist das Sensorsystem mit einem Ashtech P-12 GPS-Empfänger und Sperry VG-14A Kreisel zur Roll- und Pitch-Bestimmung ausgestattet. Das System wurde finanziert durch die CIRIT (Co-

missió Interdepartamental de Recerca i Innovació Tecnològica; die katalanische Einrichtung zur Forschungs- und Technologieförderung); es wird zur Umweltbeobachtung und zur kartographischen Erfassung eingesetzt. Die digitalen CASI-Multispektraldaten wurden bereits ausgeliefert für Wasserqualitätsanalysen, zur Forstinventarisierung, für geomorphologische Zwecke und für Landnutzungsstudien.

### 3.1 Scannen

Die Akquisition analoger Luftbilder muß hier nicht kommentiert werden. Wir werden unsere Darstellung auf den Scanvorgang und dessen „digitale Aspekte“ sowie den Prozeß der Konvertierung des photographischen Films in ein computer-lesbares Format konzentrieren. Moderne Hochleistungskameras mit Bildwanderungskompensation und kreiselstabilisierten Plattformen in Verbindung mit hochauflösenden Filmen bieten ein außergewöhnliches Potential zur Detaildetektion und -erkennung, welches durch analytische Systeme mit entsprechender Optik unmittelbar ausgenutzt werden kann. Daher sollte der Scanvorgang den Informationsgehalt moderner photographischer Systeme erhalten. Dies ist unserer Meinung nach die gegenwärtige Herausforderung für photogrammetrische Scanner. In [O. KÖLBL, U. BACH; 1994] werden die folgenden Anforderungen spezifiziert:

- Geometrische Genauigkeit:  $\pm 2 \mu\text{m}$
- Auflösung:  $10 \mu\text{m}$  für Schwarzweiß- und  $15$  bis  $20 \mu\text{m}$  für Farbaufnahmen
- Dichtebereiche:  $0.1$  D bis  $2.0$  D für Schwarzweiß- und  $0.2$  D bis  $3.5$  D für Farbaufnahmen
- Rauschen:  $0.03$  D bis  $0.05$  D für  $10 \mu\text{m}$  Pixel
- Gute Farbwiedergabe
- Datenkompression
- Benutzerfreundlichkeit, insbesondere zur Dokumentaufbereitung

Dieser Auflistung fügen wir die Forderung nach Freiheit von Artefakten in den gescannten Bildern hinzu. Dabei ist zu beachten, daß jeder Artefakt, selbst wenn er in den gescannten Da-

ten fast unsichtbar ist, nach Vergrößerung und Bildverbesserungsoperationen deutlich hervortreten kann. Eine weitgehend umfassende Liste möglicher Qualitätsprobleme ist enthalten in [E. BALTSAVIAS; 1994].

Zur Zeit besteht das Scannersystem des ICC aus einem Joyce-Loebl Scandig 2605 und einem Zeiss/Intergraph PS1.

Der Scandig 2605 ist ein *flying spot* Trommel-Schwarzweiß- und Farbscanner, der vorwiegend in der Verlagsindustrie eingesetzt wird. Der nominelle radiometrische Bereich ist  $0.2$  D bis  $2.0$  D für Schwarzweiß mit Pixelgrößen zwischen  $12.5$  und  $1000 \mu\text{m}$  und  $8$  Bit pro Pixel. Der Scandig 2605 bietet keine Möglichkeit, den Scanvorgang radiometrisch zu steuern, d.h. es ist nicht möglich, die radiometrische Transferfunktion an die Radiometrie des Filmmaterials anzupassen. In der Praxis heißt das, daß das resultierende Bild Sättigungserscheinungen aufweisen wird, falls der Dichtebereich des Films außerhalb des Dichtebereichs des Scanners liegt. Dieser Effekt tritt z.B. bei bimodalen Photographien auf, die sehr helle und sehr dunkle Bildbereiche bzw. Gipfel an beiden Enden des Histogramms haben. Dem Konzept, den Scanvorgang an das Filmmaterial anzupassen, liegt die Idee zugrunde, den verfügbaren Dichtebereich des Scanners an den wesentlichen Dichtebereich des Films heranzuführen.

Wegen des Mangels an radiometrischen Anpassungsmöglichkeiten benutzen wir den JOYCE-LOEBL-Scanner für kontrastausgeglichene Schwarzweiß- und Farbpositive. NEWTON'sche Ringe können beim Scannen dünner Filme auftreten, wenn sie nicht sorgfältig auf der Trommel befestigt werden. Die geometrische Genauigkeit betreffend wurden Standardabweichungen von  $13 \mu\text{m}$  entlang der Trommelumfangsachse und  $9 \mu\text{m}$  in Richtung der Rotationsachse für eine Pixelgröße von  $25 \mu\text{m}$  beim Scannen bestimmt. Außerdem erwies sich das Fehlen eines Monitors zur On-line Bildkontrolle als nachteilig beim operationellen Betrieb, weil radiometrische Probleme erst nach aufwendigem Datentransfer durch eine Betrachtung des Bildes an einer Arbeitsstation aufgedeckt werden konnten. Die durchschnittliche Dauer des Scanvorgangs für  $25 \mu\text{m}$  Pixelgröße beträgt  $35$  Minuten für Schwarzweiß- und

90 Minuten für Farbbilder. Trotz dieser Einschränkungen in Geschwindigkeit und Genauigkeit wurde der Scandig 2605 für die gesamte digitale Orthophotoproduktion seit 1989 verwendet.

Der PS1 ist ein Flachbett-Schwarzweiß- und -Farbscanner, ausgerüstet mit einem linearen Sensor von 2048 CCD-Detektoren. Er ist konzipiert für den 0.2 D bis 2.0 D Dichtebereich mit Pixelgrößen von 7.5, 15, 22.5, 30, 60 und 120  $\mu\text{m}$  und 8 Bit/Pixel. Die Photographie wird streifenweise gescannt, da der Film auf einer hochpräzisen Bühne unter dem Scannerkopf bewegt wird. Der PS1 gibt die Pixelgrauwerte proportional entweder zum Transmissionsgrad oder zur Dichte positiver oder negativer Photographien wieder. Das Bild kann während des Scanvorgangs mittels einer Hardwarekarte nach dem JPEG-Kompressionsstandard komprimiert werden [W. B. PENNEBAKER, J. L. MITCHELL; 1993]. Farbfilme werden in drei getrennten Durchgängen unter Verwendung entsprechender RGB-Filter gescannt. Experimentell wurde eine geometrische Genauigkeit von 1.4  $\mu\text{m}$  für ein gescanntes Kalibrierungsgitter auf einer Glasplatte bestimmt.

Im Gegensatz zum Scandig 2605 ermöglicht der PS1 eine radiometrische Steuerung, indem eine Transferfunktion zur Konvertierung der internen 13 Bit-Eingabe in eine 8 Bit Ausgabe abgeleitet wird. Die Transformation basiert auf den zuvor bestimmten maximalen und minimalen Dichtewerten des Films. Die Funktion ist linear, wenn das Scannen im Transmissionsmodus durchgeführt wird und logarithmisch, wenn im Dichtemodus gescannt wird. Der Benutzer kann die Transferkurve interaktiv modifizieren, wenn radiometrisch extreme oder komplexe Bilder (z. B. mit bimodalen Histogrammen) bearbeitet werden, für die die voreingestellte Kurve voll gesättigte Bilder ergeben würde. In diesem Fall erlaubt die interaktive radiometrische Steuerung ein empirisches Herantasten an ein optimales Scanergebnis. Während des iterativen Prozesses kann der Benutzer die Hilfsmittel zur Histogrammanalyse nutzen und Vorteile aus der Anzeige des Scanergebnisses unmittelbar nach einer Änderung der Transferkurve ziehen.

Wegen der Möglichkeiten zur radiometri-

schen Steuerung und zur Umwandlung von Positiven in Negative kann die Bearbeitungsdauer im Photolabor reduziert werden, indem das Negativ mit einem größeren Dichtebereich direkt gescannt wird. Während dieser Vorgang für Schwarzweißnegative zufriedenstellende Bilder auch ohne Kontrastausgleich liefert, treten für Farbnegative wegen der während der Abbildung verwendeten Farbfilter Schwierigkeiten auf. Der einzige verbleibende Artefakt ist ein leichter Helligkeitsabfall vom Zentrum des abgetasteten Streifens zum Rand, der durch die interne Normalisierungsprozedur zur Kompensation von Inhomogenitäten zwischen benachbarten Elementen des CCD-Sensors nicht vollständig korrigiert werden kann. Glücklicherweise ist dieser Einfluß, wenn man von großen, dunklen homogenen Gebieten (z. B. Ozeanflächen) absieht, unsichtbar. Eine Abwandlung des CCD-Normalisierungssystems wurde bereits vorgeschlagen, um den Einfluß zu eliminieren.

Obwohl der Scanvorgang für jede Photographie individuell an den Film angepaßt werden könnte, wenden wir diese Methode nicht für Orthophotos an, die zu einem Mosaik zusammengefügt werden sollen, denn individuell optimierte Abtastungen führen sehr leicht zu radiometrisch unterschiedlichen, im Mosaik benachbarten Bildern. Stattdessen ziehen wir es vor, die Bildqualität nach der Mosaikgenerierung für alle beteiligten Photos gemeinsam zu verbessern. Zunächst wird eine vorausgehende Analyse der zu einem Projekt gehörenden Bilder durchgeführt und eine Auswahl repräsentativer Bilder mit niedriger Auflösung gescannt, um eine interaktive Anpassung durchzuführen. Die voreingestellten Dichtewerte werden für den gesamten Block bestimmt, indem die niedrigste und höchste minimale bzw. maximale Dichte der Beispielfelder ermittelt wird. Falls keine besonders schwierigen Einzelbilder auftreten, die eine schrittweise empirische Anpassung der radiometrischen Parameter erfordern, beträgt die Dauer des Scanvorgangs am PS1 für Schwarzweißaufnahmen einschließlich Kompression weniger als 10 Minuten bei 15  $\mu\text{m}$  Pixelgröße. Das Schreiben der Daten auf ein 2.3 GByte Exabyteband dauert weitere 6 Minuten. Die entsprechenden Verarbeitungszeiten für Farbbilder sind etwa dreimal so lang.

Zusammenfassend ist festzuhalten, daß das Scannen ein empfindlicher Prozeß ist, der die volle Aufmerksamkeit eines erfahrenen Operateurs erfordert, um qualitativ hochwertige digitale Bilder zu erhalten. Unter diesem Gesichtspunkt sind die Anforderungen wahrscheinlich ähnlich denen im professionellen Verlagswesen. Die Erfahrungen am ICC zeigen, daß Hersteller von Scannern für den erfolgreichen Einsatz ihrer Produkte klare und gut dokumentierte Diagnosemittel zur Verfügung stellen müssen, um dem Benutzer zu erlauben, Fehler oder Abweichungen des Systems von den geometrischen und radiometrischen Normalwerten zu überwachen. Außerdem sollte ein Scanner immer als ein Präzisionsinstrument betrachtet werden.

### 3.2 Kompression

Bildkompression ist ein Verfahren, mit dem Bilddaten mit kleinerem Speicherbedarf abgespeichert und Übertragungszeiten reduziert werden können. Der JPEG-Standard ist eine Familie von Bildkompressionsverfahren, die unterschiedliche Algorithmen kombinieren [W. B. PENNEBAKER, J. L. MITCHELL; 1993]. Im PS1-Scanner und in der Intermap-Stereostation ist eine Version des JPEG-Bildkompressionsverfahrens implementiert worden, die Informationsverlust zuläßt. Für ein Farbbild wird im ersten Schritt die Farbinformation von dem RGB Farbsystem in YCbCr System (1 Luminanz, 2 Chrominanz) umgerechnet. Die erste Reduktion besteht aus einer Vorab-Kompression der Chrominanzkanäle um den Faktor 4. Dann wird

das Bild in Quadrate der Größe 8x8 Pixel aufgeteilt und für jedes Quadrat eine DCT-Transformation (*Direct Cosine Transform*) gerechnet. Die Koeffizienten werden danach quantisiert und als *Huffman Code* komprimiert.

Die im PS1 und in der Stereostation implementierte Version des JPEG-Verfahrens erlaubt die Änderung der Kompressionsrate durch den sogenannten Q-Faktor.

Es bleibt dem Benutzer überlassen, einen bestimmten Q-Faktor zu wählen und damit den Informationsverlust bzw. die Kompressionsrate zu beeinflussen. Für einen gegebenen Q-Faktor hängt die Kompressionsrate vom Bildmaterial und für ein gegebenes Bild von den Scanparametern ab. Da der PS1-Scanner Farbbilder in drei getrennten Durchgängen abtastet und jedes Farbband sofort individuell komprimiert, ist er nicht in der Lage, die Kompression der Chrominanzkanäle vorab durchzuführen. Dies führt zu einer Verschlechterung der Gesamtkompressionsrate um ungefähr den Faktor 2.

Am ICC entschied man sich nach visueller Analyse der Kompressionseffekte auf feine Details dazu, einen Q-Faktor von 30 (aus einem Wertebereich von 1 bis 799) einzusetzen. Tabelle 1 zeigt die entsprechenden Kompressionsresultate. Ein Verlust der Punktgenauigkeit durch die Datenkompression wurde weder getestet noch bemerkt (siehe auch [J. JAAKKOLA, E. ORAVA; 1994]). Trotzdem befürchten wir, da eine potentiell gefährliche Situation vorliegt, daß der Benutzer keine Information über das Ausmaß des Informationsverlusts erhält. Außerdem sind die Auswirkungen von Bildverbesserungsoperationen während verschiedener

Tabelle 1: Zur Bildkompression

3 separate Dateien für Eingabe und Ausgabe im Fall ohne Kompression; 3 separate komprimierte Dateien für Eingabe und eine komprimierte RGB-Datei im Fall mit Kompression. Rektifizierung für 12 000 x 12 000 Pixel auf einem Intermap 6487 System mit VITEC-Bildverarbeitungsprozessor

	PS 1 Abtastung [min]	Exabyte Speicherung [min]	Orthorektifizierung	
			CPU-Zeit [min]	Ausführungszeit [min]
Farbe 15 µm unkomprimiert	3 x 17	3 x 21	5,5	9,5
Farbe 15 µm komprimiert	3 x 10	3 x 6	5,5	7,7

Verarbeitungsschritte mit der dabei auftretenden Dekomprimierung beim Datenlesen und der anschließenden Komprimierung beim Datenschieben weder analysiert noch theoretisch untersucht worden.

#### 4. Orientierung und Normalisierung

Die Sensororientierung muß hier nicht beschrieben werden. Wir betrachten sie in einem allgemeinen Sinn und schließen den Punkttransfer mit ein. Die Bildnormalisierung schließt die Orthophotoherstellung, die Bildentzerrung und die Umrechnung in Epipolargeometrie mit ein. Moderne allgemeine Sensororientierung erfordert ein klares Verständnis der geodätischen Positions- und Orientierungsbestimmungstechniken und der Sensorgeometrie. Im Vergleich zur konventionellen Aerotriangulation erfordert die Sensororientierung eine noch intensivere Integration der Geodäsie in die photogrammetrischen Methoden.

##### 4.1 Digitale Punktübertragung

Die digitale Punktübertragung ist die einzige Lücke im digitalen photogrammetrischen Arbeitsfluß am ICC. Wir sehen das wesentliche Problem darin, daß kein vollautomatisches System auf dem Markt verfügbar ist (obwohl ein derartiges System existiert [V. TSINGAS; 1991]). Nichtsdestoweniger wurde ein digitaler Punkttransfer für SPOT-Szenen durchgeführt, und eine entsprechende Methode wird zur Zeit für CASI-Blöcke entwickelt.

##### 4.2 Herstellung digitaler Orthophotos

Erste Versuche zur Herstellung digitaler Orthophotos sind am ICC schon vor acht Jahren durchgeführt worden. Im Jahre 1988 wurde ein erstes produktionsreifes System fertiggestellt. Es hatte ein Durchsatzvolumen von bis zu 15 Schwarzweiß-Orthophotos pro Tag auf einer MicroVax 3600 (ohne Mosaikherstellung). Die endgültige Bildkartenaufbereitung wurde im Photolabor mit traditionellen Mitteln durchgeführt. 1990 wurde das System erweitert um Komponenten zur interaktiven Mosaikherstellung, einen großformatigen Rasterplotter und

CAD-Arbeitsstationen für die Aufbereitung der Orthophotokarte, die die Platzierung der geographischen Namen und die automatische Generierung von Kartengitter, -rahmen und -legende einschließt. Hierdurch wurden die manuellen Aufgaben im Photolabor ersetzt. Der langfristig erzielte Produktionsdurchsatz betrug für ein System aus zwei Arbeitsstationen zur Bildrektifizierung und zwei Arbeitsstationen für die Bildkartenaufbereitung 1 druckfertige Orthophotokarte auf Film pro 2 Stunden. Eine vollständige Beschreibung des Systems, wie es Mitte 1991 bestand, gibt [I. COLOMINA et al.; 1991]. 1992 wurde die Orthophotokarte von Katalonien im Maßstab 1:5000 einschließlich einer Höhendatenbank fertiggestellt. Nach der Herstellung einer Schwarzweiß-Orthophotokarte 1:25 000 im Zeitraum 1992/1993 begann Ende 1993 ein Projekt zur Ableitung einer Farb-Orthophotokarte 1:25 000 aus Bildern im Maßstab 1:60 000.

#### **Acht Jahre digitale Orthophotoproduktion: auf dem Wege zu einer Integration von digitaler Photogrammetrie und Fernerkundung**

Im Laufe der Jahre haben sich die Systemkomponenten zur geometrischen Prozessierung kaum verändert, während die Bildverarbeitungs-komponenten einer kontinuierlichen Entwicklung zur Integration neuer Fähigkeiten unterliegen, um steigenden Nutzeranforderungen zu genügen. Die operationellen Grenzen des Systems des ICC wurden durch das Farb-Orthophotoprojekt praktisch vollständig ausgefüllt. Die Verarbeitung von Farbdaten benötigte nicht nur einen dreimal größeren Speicherplatz, die Forderung nach einem wirklich nahtlosen Mosaik, eine reduzierte Pixelgröße am Bildschirm und hohe Bildqualitätsanforderungen erzwangen außerdem die Entwicklung und Implementierung von zunehmend aufwendigeren und rechenintensiveren Bildverarbeitungs-algorithmen.

Tabelle 2 zeigt die Rechenzeiten für die Farb-Orthophotoherstellung. Sie entsprechen den Zeiten zur Rektifizierung, Mosaikgenerierung und Bildverbesserung für zwei teilweise überlappende Bildausschnitte mit je 150 MByte im Mastab 1:60 000 mit 25 µm Pixelgröße (entspre-

Tabelle 2: CPU- und Ausführungszeiten für die individuellen Verarbeitungsschritte bei der Orthophotproduktion  
Ankerpunkte alle 10 Pixel; kubische Interpolation bei der Umrechnung in Epipolargeometrie; unkomprimierte Ein- und Ausgabedateien auf einer gemeinsamen Platte

Verarbeitungsschritt	VaxStation 4000/90		ImageStation mit VITEC-50 Prozessor	
	CPU-zeit [min]	Ausführungszeit [min]	CPU-zeit [min]	Ausführungszeit [min]
Vorbereitung (Dateiumformatierung)	16	38	11	19
Bildrektifizierung (zwei Bilder)	40	62		
Mosaikvorbereitung	3	15		
Man. Markierung der Mosaiksäume		20		
Mosaikgenerierung, 1. Durchgang (Farbabstimmung, 3 Schritte)	20	66		
Man. Verbesserung der Mosaiksäume		20		
Mosaikgenerierung, 2. Durchgang (Zusammenfügen, 1 Schritt)	10	15		
Bildverbesserungsfilter (2 Schritte)	95	123		

chend 1.5 m im Objektraum) bei einer Pixelgröße von 1.8 m im endgültigen Orthophoto. Es ist ersichtlich, daß der Dateizugriff (Ein-/Ausgabe) den wesentlichen Engpaß im gegenwärtigen System darstellt. Mit der augenblicklichen Systemkonfiguration (zwei Arbeitsstationen) kann ein Farb-Orthophotomosaik alle 3 Stunden (bzw. bei nächtlicher Stapelprozessierung für die letzten beiden Verarbeitungsschritte alle 1.8 Stunden) fertiggestellt werden. Zum Vergleich führen wir die Rechenzeiten für eine Rektifizierung auf einer digitalen photogrammetrischen Stereoarbeitsstation ImageStation 6487 von Intergraph mit VITEC Prozessor an.

Es ist bemerkenswert, daß die Bildverarbeitungsschritte (Farbabstimmung und Bildverbesserungsfilter) 62 % der CPU-Zeit beanspruchen. Obwohl eine detaillierte Beschreibung der Bildverarbeitungsschritte außerhalb des Rahmens dieser Darstellung liegt, sei bemerkt, daß die Bildverbesserungsoperationen eine CPU-intensive Faltung mit einem 7 x 7 Pixel großen Filterkern und eine lokale Farbverbesserung für 150 MByte umfassende Orthophotomosaik erfordern. Der verwendete Filter bewirkt eine Bildrestauration zur Verringerung der Einflüsse von Diffraction, Aberration, at-

mosphärischen Turbulenzen, Bewegung und Scanfehlern [PRADES et al.; 1994].

Es mag eingewendet werden, daß einige der Bildverarbeitungsverfeinerungen den erhöhten Rechenzeitaufwand nicht wert sind. Zum Beispiel ist bekannt, daß eine bilineare Interpolation bei der Rektifizierung in der Regel zu einer ausreichenden Bildqualität führt, und da Pixelgrößen in Halbtonbildern nicht weniger als 0.1 mm im Bild (dieser Wert wurde als „magische Zahl“ für die Definition der Ausgabepixelgröße verwendet) zu betragen brauchen, um eine gute Druckqualität zu erreichen. Dennoch ist die Situation geringfügig anders, wenn man bedenkt, daß ein gedrucktes Farb-Orthophoto die Qualitätsstandards der Verlagsindustrie erfüllen muß, jedoch ein digitales Orthophoto zur Datenerfassung und Digitalisierung am Bildschirm verwendet wird (siehe Abschnitt 5.1).

Digitale photogrammetrische Arbeitsstationen müssen gut abgestimmte Computersysteme mit hoher Rechenleistung und kurzen Datenzugriffszeiten sein. Beispielsweise sind die digitalen photogrammetrischen Arbeitsstationen von Intergraph mit einem Bildverarbeitungsprozessor (dem VITEC-50) zur Beschleunigung mehrerer grundlegender Bildverarbeitungsfunktion

ausgestattet. Der Prozessor ermöglicht eine kontinuierliche Bildverschiebung und Echtzeit-Interpolationen zur Bildvergrößerung während der Stereoauswertung; er führt alle Pixelinterpolationen für die Bildpyramidenerzeugung, die Umrechnung in Epipolargeometrie und die Orthophotogenerierung aus. Durch die Benutzung der Bildrektifizierungssoftware des Prozessors konnten wir die benötigte CPU-Zeit für den geometrischen Verarbeitungsschritt (s. Tabelle 2) um den Faktor 41 und die Ausführungszeit um den Faktor 3 verkürzen. Wenn man berücksichtigt, daß die Umwandlung des Bildformats zu Beginn des Verarbeitungsprozesses für den PS1-Scanner und Intergraph-Systeme nicht erforderlich ist, verkürzt sich die Ausführungszeit sogar um den Faktor 5. Wenn außerdem komprimierte Farbbilder verwendet werden (drei individuelle komprimierte Eingabedateien und eine komprimierte Ausgabedatei), wird der Faktor 6.5 erreicht.

Die genannten Daten und die Betrachtungen des vorhergehenden Abschnitts haben gezeigt, daß jedes operationelle produktionsorientierte digitale photogrammetrische System die geometrische Verarbeitung, die Bildverarbeitung und die Benutzerfunktionen integrieren muß und daß diese Integration eine leistungsfähige Hardwarearchitektur und ein transparentes und flexibles Softwaresystem erfordert. Dies gilt insbesondere für die Herstellung digitaler Orthophotos und stellt eine Herausforderung für unsere gegenwärtige Systemumgebung dar.

## 5. Interpretation

Nachdem die Orientierung und die Normalisierung abgeschlossen sind, beginnt die eigentliche Auswertung der Bilder. Wir bezeichnen diesen Schritt in einem sehr allgemeinen Sinn als Bildinterpretation, in dem im weitesten Sinne die Merkmalsextraktion und Bildklassifikation stattfindet. Beispiele hierfür sind die automatische oder manuelle DGM-Generierung, das Mono- und Stereoplotting von Objekten für topographische Karten und Katasterkarten und die Merkmalsextraktion für Landnutzungs- und Umweltstudien. Die Bildinterpretation ist die bei weitem zeitaufwendigste Aufgabe, die da-

her am meisten von einer Automatisierung profitieren könnte.

### 5.1 Herstellung der Topographischen Karte 1:50 000 durch Digitalisierung von Orthophotos

Seit 1992 sind die digitalen Orthophotos des Orthophotokartenprojekts 1:25 000 für die Herstellung der digitalen Kartendatenbank BCN-50 (base cartogràfica numèrica; digitale kartographische Kartenbasis) verwendet worden. BCN-50 wird für GIS-Anwendungen und für die Veröffentlichung der „Mapa Comarcal de Catalunya“ im Maßstab 1:50 000 verwendet. Die Datenerfassung für BCN-50 erfolgte im Rahmen der Orthophotointerpretation an Intergraph-Stationen. Schon am Anfang des Projekts gaben wir die Interpretation von SPOT-Szenen wegen ihrer geringen 10-m/Pixel-Auflösung auf und arbeiteten zunächst mit Schwarzweißorthophotos mit 2.5 m Pixelgröße und später mit bildverbesserten Farorthophotos mit 1.8 m Pixelgröße aus dem bereits erwähnten Bildflug im Maßstab 1:60 000. Ein Vergleich der Datenerfassungszeiten ergab eine Produktionssteigerung um 8 % infolge besserer und schnellerer Identifikation — etwa 6 % Produktionssteigerung waren auf die Verwendung von Farbbildern und 2 % auf die bessere Auflösung der verwendeten Bilder zurückzuführen. Die prozentual zwar geringe Gesamtsteigerung ist dennoch wichtig, wenn berücksichtigt wird, daß im Projekt 18 Personen ganzjährig beschäftigt sind.

### 5.2 Nachführung der Grundkarte Kataloniens durch digitale Stereoauswertung

Die kürzlich vollendete Topographische Grundkarte von Katalonien im Maßstab 1:5000 wurde im Laufe der letzten sieben Jahre mit Hilfe von computer-unterstützten analogen Stereoplottern hergestellt. Die erste Nachführung der Kartenserie ist für Ende 1994 vorgesehen. Die Entscheidung, die Kartenfortführung durch Stereoeinblendung vorzunehmen, wurde bereits vor längerer Zeit getroffen. Zu dieser Zeit, im Jahre 1991, konnte kein analytischer Plotter mit dreidimensionaler Einblendung auf dem



Markt gefunden werden, der in der Lage war, mit den bereits existierenden MicroStation-Dateien ohne Umformatierung zu arbeiten. Deshalb wurde eine frühe Version der Intermap digitalen Stereoarbeitsstation von Intergraph erworben. Im September 1993 wurde die erste digitale Stereoarbeitsstation zum Test unter Produktionsbedingungen bereitgestellt. Nach drei Monaten waren die Produktionsergebnisse so gut, daß drei weitere Systeme bestellt wurden. Es sei angemerkt, daß mit der Intermap nur in Epipolargeometrie umgerechnete Bilder stereoskopisch bearbeitet werden können.

### *Pixelgröße*

Die Topographische Karte 1:5000 basiert auf dem landesweiten Bildflug im Maßstab 1:22 000. Das schwarzweiße Bildmaterial wurde durch moderne Kameras mit Bildwanderungskompensation auf hochauflösendem Film aufgenommen. Als wir begannen, die genaue Pixelgröße zu definieren, stellten wir fest, daß eine Abtastung mit 15 µm Pixelgröße (entsprechend 0.33 m/Pixel) die erforderliche Detailauflösung wahrscheinlich nicht ermöglichen würde. Um den Sachverhalt genauer zu untersuchen, wurde das gleiche Gebiet sowohl an einem SD-2000 Stereoplotter als auch an einer digitalen Stereoarbeitsstation unter Verwendung von Bildmaterial mit 7.5 µm bzw. 15 µm Pixelgröße ausgewertet. Das Testgebiet enthielt ländliche und mäßig bebaute städtische Areale. Ein Vergleich der Resultate zeigte, daß keine Differenzen für ländliche und offene Bereiche und geringe Differenzen in einzelnen Details in den städtischen Bereichen auftraten. Da der Umgang mit 7.5-µm-Bildern selbst auf hochwertigen digitalen Stereoarbeitsstationen wegen des Datenumfangs Schwierigkeiten bereitet [J. L. COLOMER; 1993], wurde beschlossen, die 15-µm-Bilder zu verwenden.

Es sei bemerkt, daß der Detailreichtum in der Grundkarte 1:5000 in städtischen Gebieten wahrscheinlich etwas geringer ist als in ähnlichen Kartenwerken anderer Länder. Diese Tatsache erklärt, warum der Bildmaßstab von 1:22 000 verwendet werden kann und warum die Pixelgröße von 15 µm das Endergebnis kaum beeinflusst. In anderen Worten, unsere Tests

zielten nicht darauf ab, eine absolute Größe für den Nutzen der hohen Auflösungsfähigkeiten optischer Bilder im Vergleich mit digitalen Bildern zu ermitteln, sondern eher darauf, abzuschätzen, ob die Datenerfassung für das zu bearbeitende Projekt mit einem digitalen Stereoplotter bei 15 µm Pixelgröße durchführbar ist. In dem Kartennachführungsprojekt, das in Kürze anlaufen wird, hoffen wir, den Detailreichtum in städtischen Gebieten durch die Verwendung größerer Bildmaßstäbe (1:12 000 bis 1:15 000) zu verbessern und nähern uns damit den traditionell verwendeten Bildmaßstäben für Karten im Maßstab 1:5000 an.

### *Arbeitsfluß*

Der Arbeitsfluß beginnt mit dem Scannen der Schwarzweißnegative, die während des Scannens zu Positiven umgewandelt werden. Da noch keine digitale Punktübertragung bzw. digitale Punktmessung benutzt wird, müssen die Positive im Punktübertragungsgerät bearbeitet und am Wild AC-1 analytischen Plotter aerotrianguliert werden. Die Orientierungsparameter aus der Bündeltriangulation werden an der digitalen Stereoarbeitsstation unmittelbar nach der inneren Orientierung eingeführt; d. h. die Operateure führen keine relative und absolute Orientierung mehr aus. Die Umrechnung in Epipolargeometrie wird unter Verwendung der Orientierungsparameter aus der Bündelausgleichung durchgeführt.

Ein wichtiger Gesichtspunkt ist das Datenmanagement. In einer digitalen photogrammetrischen Arbeitsumgebung muß man mit den üblichen Problemen einer computer-basierten Arbeitsumgebung zurechtkommen: Plattenplatz muß verwaltet werden, Dateien müssen gesichert und wieder eingelesen werden, Hintergrundprozesse müssen gestartet werden, usw. Es ist uns selbstverständlich, daß der Operateur eines Stereoplotters von diesen Aufgaben soweit wie möglich befreit sein sollte, um seine Aufgaben kontinuierlich, komfortabel und sicher ausführen zu können. Deshalb wurde das Konzept eines „photogrammetrischen Servers“ implementiert. Dieser Server ist eine Stereoarbeitsstation mit einem Exabyte-Bandlaufwerk und großem Plattenplatz zum Speichern

der Eingabebilder, Projektdateien und aus in Epipolargeometrie umgerechneten Bildern bestehenden Modelle. Wenn ein Operateur ein neues Modell benötigt, wird das epipolare Bildpaar über Ethernet auf seine Arbeitsstation übertragen. Er kann dann die Stereoauswertung durchführen, anschließend die Graphikdatei zurück zum Server übertragen und die Modelldateien löschen. Alle Dateien auf dem Server werden über Nacht im zentralen Datenarchiv gesichert. Die Server-Arbeitsstation führt die Umrechnung in Epipolargeometrie über Nacht in Hintergrundverarbeitung aus und wird in Zukunft die digitale Punktübertragung und -messung unterstützen.

### *Ergonomie*

Als wir die digitale Stereoarbeitsstation in unsere Produktionsumgebung aufnahmen, waren wir unter anderem besorgt um das Verhältnis des Operateurs zum System, Übermüdigungserscheinungen und/oder Überanstrengung der Augen, die Benutzung des neuen handgehaltenen Cursors anstelle der Handräder, die kurzen Verzögerungen während der Auswertung wegen des Nachladens neuer Bildteile bzw. graphischer Information in den Bildverarbeitungsprozessor (zwecks Bildverschiebung, Bildvergrößerung und -verkleinerung bzw. Wechsel der Ebene graphischer Details) und das Einblenden von Vektorgraphik in die Stereobild-darstellung. Glücklicherweise stellte keiner dieser Gesichtspunkte ein ernsthaftes Problem dar.

Anfänglich brauchte der Operateur zwei fünfzehnminütige Pausen während einer 7.5stündigen Schicht wegen Überanstrengung der Augen und Müdigkeit. Die Ursache für die Ermüdungserscheinungen war eine zu starke und direkte Beleuchtung des Arbeitsplatzes. Nachdem der Raum halb abgedunkelt wurde, berichteten die Operateure über wesentlich komfortablere Arbeitsbedingungen. Sie gewöhnten sich auch rasch an den handgehaltenen Cursor und die Stereobetrachtungsbrillen und lernten, daß die Superimposition irreführend sein kann, wenn Linien mit der zweidimensionalen Projektion eines dreidimensionalen graphischen Elements zusammenfallen (*overshoot-*

*ing effect in 3D*). Papiermenüs auf dem Sensortablett der Stereoarbeitsstation wurden den *pull-down* Menüs am Bildschirm vorgezogen. Eine verzögerte Bildschirmanzeige ist während der Datenerfassung selten, weil der Operateur die Bildverschiebung bei niedriger Geschwindigkeit ausführt und das System neue Bildteile im voraus lädt. Änderungen des Vergrößerungsfaktors oder das Zu- bzw. Abschalten der Graphikebene treten nur selten auf.

Ein individuelles Training für Operateure von analytischen Stereoplottern dauert zwei Tage; danach dauert es zwei bis drei Wochen, bis sie mit der Stereoarbeitsstation vertraut sind. Während dieser Eingewöhnungszeit haben die Operateure das System oft fehlerhaft, und Systemabstürze treten häufig auf. Während der Einarbeitung ändert sich die Haltung des Operateurs von einem anfänglichen Mangel an Vertrauen zu wirklicher Begeisterung, sobald er/sie mit dem System vertraut wird. Die Stereoeinblendung von graphischen Details ist bei weitem das „beliebteste“ Detail der digitalen Stereoarbeitsstation.

### *Produktivität*

Natürlich ist die wichtigste Frage, die alle Nicht-Operateure interessiert, die nach der Produktivität. Repräsentative Zahlenangaben zum Vergleich von analytischen Stereoplottern und digitalen Stereoarbeitsstationen liegen jetzt vor für das Gebiet der Pyrenäen. Dieses Gebiet wird im wesentlichen dominiert von einem komplexen topographischen Relief, das durch Profile und Bruchkanten erfaßt ist. Aus den Eingabedaten wurden Höhenlinien abgeleitet und bei Bearbeitung am SD2000 analytischen Plotter nachträglich ohne Stereoeinblendung, bzw. bei Bearbeitung an der Stereoarbeitsstation während der Erfassung geprüft. Wenn die Zeiten zur nachträglichen Prüfung mit einbezogen werden, zeigte sich nach einer einjährigen Arbeitsperiode von zwei Operateuren an Intermap Stereoarbeitsstationen eine Produktivitätssteigerung von 15,4 % zugunsten der digitalen Stereoarbeitsstation. Die Steigerung ist eindeutig auf die Stereoeinblendung an den Intermap Arbeitsstationen zurückzuführen, die zu einer vollständigen Eliminierung der

nachträglichen Ergebnisprüfung geführt hat. Bei einem Vergleich der reinen Stereoauswertzeiten reduziert sich der Produktivitätsgewinn auf bescheidenere 6.2 %. In einer Studie zum Vergleich der Betriebskosten eines analytischen Stereoplotters mit optischer Einblendung mit denen eines digitalen Stereoplotters fand R. SCHROTH [1992] basierend auf Preisen von 1992 eine 30%ige Differenz zugunsten des analytischen Plotters. Dieser Wert wurde durch unsere eigenen Untersuchungen mit aktualisierten Anschaffungspreisen, 4jähriger Abschreibungsperiode für ein digitales System, bzw. 8jähriger Abschreibungsperiode für einen analytischen Stereoplotter, Scannen durch ein externes Servicebüro (etwa 85 DM pro Bild bei 15 µm Pixelgröße) und mit einer Vollzeitstelle pro Jahr für das Systemmanagement und die Aufrechterhaltung des Operationsflusses bestätigt. Es sei erwähnt, daß die durchschnittliche Ausfallzeit für unsere vier INTERMAP-Systeme fast 2,5 % beträgt und auf computer-bezogene Probleme zurückzuführen ist.

Insgesamt betrachtet zeigen unsere Produktionszahlen unter dem oben definierten ökonomischen Szenario, daß nur dann eine Möglichkeit besteht, die Kosten für eine hochleistungsfähige digitale Stereoauswertumgebung zu reduzieren, wenn billigere Systeme und mehr Automation zum Einsatz kommen. Tatsächlich wurde bei der Stereoauswertung noch nicht der Automationsstand erreicht, der für die digitale Orthophotoproduktion üblich ist. So wird z. B. die (halb)automatische digitale Punktübertragung dazu führen, daß die Stereoauswertung mit Stereoarbeitsstationen für die professionelle Welt wirtschaftlich attraktiver wird.

### 5.3 Automatische DGM-Erfassung

Wir haben unser erstes großräumiges Projekt zur automatischen Oberflächenrekonstruktion im Rahmen eines 1:25 000 Farb-Orthophotokartenprojekts in Venezuela begonnen. Die Projektparameter sind ähnlich denen des zuvor erwähnten 1:25 000 Farb-Orthophotokartenprojekts für Katalonien mit der einzigen Ausnahme, daß die Bodenpixelgröße 2,5 statt 1,8 m beträgt. In das Venezuela-Projekt ist die Ableitung eines digitalen Geländemodells einge-

geschlossen; zu diesem Zweck wird das MATCH-T System [P. KRZYSZEK; 1991] auf der Intermap-Station eingesetzt. Vor diesem Projekt wurde MATCH-T intensiven Tests in Katalonien und Venezuela unterzogen. Für Katalonien wurden Bilder im Maßstab 1:60 000 und eine Höhendatenbank aus Bildern im Maßstab 1:22 000 verwendet; für Venezuela griff man auf aus den Projektbildern manuell ermittelte Höhen zurück. Die Ergebnisse der Tests sind, daß die Qualität des resultierenden DGMs sehr von der Geländemorphologie und der Textur abhängt, daß Selbstdiagnose im Sinne einer automatischen Qualitätskontrolle noch nicht ausgereift ist, daß die Produktion hochgenauer Geländemodelle zusätzliche manuelle Arbeit erfordert und daß die automatische Herstellung von DGMs zur Orthorektifizierung machbar ist, vorausgesetzt daß eine zusätzliche Qualitätskontrolle und Korrekturen durchgeführt werden.

Der Produktionsfluß für das Venezuela-Projekt wurde entsprechend eingerichtet. Die Abtastung wird zweimal mit dem PS1 durchgeführt, und zwar mit 15 µm Pixelgröße und dem „clear“-Filter für die DGM-Generierung und mit 30 µm Pixelgröße und den Farbfiltern für die Orthophotoherstellung. Die DGM-Generierung mit MATCH-T wurde bei der zweiten Bildpyramidenebene (30 µm Pixelgröße) abgeschlossen, was 35 Minuten Rechenzeit pro Programmablauf – anstelle von mehr als 2 Stunden bei zusätzlicher Verwendung der ersten Bildpyramidenebene (15 µm Pixelgröße) – erfordert. Das Scannen mit 15 µm Pixelgröße ist erforderlich für die visuelle Qualitätskontrolle; der „clear“-Filter wird verwendet, um ein Schwarzweißbild zu erzeugen, das mehr oder weniger exakt die Leuchtdichte wiedergibt und sowohl für MATCH-T als auch die Betrachtung durch die Operateure geeignet ist (eine Transformation in andere Farbdekompositionen dauerte zu lange, und die Verwendung eines einzigen Farbkanales, rot oder grün zum Beispiel, wurde durch die Operateure abgelehnt).

Sobald die Bilder gescannt sind, werden die Umrechnung in Epipolarometrie und ein erster MATCH-T Lauf als Batchprozesse ausgeführt (die Bildorientierungen lagen bereits vor). Dann wird eine visuelle Qualitätskontrolle

durch Stereoeinblendung an der Intermap-Station durchgeführt. Wo der Operateur zu große Diskrepanzen feststellt, mißt er zusätzliche Punkte für einen zweiten MATCH-T Lauf. Typischerweise resultiert dieser Arbeitsschritt in etwa 2000 manuell gemessenen zusätzlichen Punkten pro Modell und dauert etwa 2 Stunden. Der Prozeß kann wahrscheinlich noch beschleunigt werden, indem die Anzahl der manuell gemessenen Punkte reduziert wird, daß die Operateure noch vertrauter mit den Eigenschaften von MATCH-T werden. Daneben wird versucht, die Unterschiede der aus dem linken und dem rechten Bild erzeugten Orthophotos zu verwenden, um den Operateuren beim Suchen inkorrekturer Höhen eine Hilfe zu geben [F. NORVELLE; 1994]. An dieser Stelle sei erwähnt, daß wir sehr rauhes, dicht bewaldetes Gebirgsgelände bearbeiten. Außerdem hätte eine manuelle Generierung der Höhendaten mindestens 10 Stunden gedauert. MATCH-T ist daher ein weiteres erfolgreiches Beispiel für die Automation durch digitale Photogrammetrie.

## 6. Ausblick

Bei der Beurteilung unserer Erfahrungen nach acht Jahren seit der Einführung digitaler photogrammetrischer Systeme kommen wir durchaus zu einer sehr positiven Bilanz. Die digitale Photogrammetrie zeigt ihre Stärke, wenn es zur Anwendung automatischer Verfahren kommt. Die automatische Generierung von Orthophotos und DGMS sind erste Beispiele hierfür.

## 7. Literatur

- BALTSAVIAS, E. P., 1994: Test and procedures for image scanners. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 30(1), 163–170.
- COLOMER, J. L., 1993: First experiences using digital photogrammetric stereo workstations at the ICC. *Photogrammetric Week '93*, Wichmann, Karlsruhe, 185–195.
- COLOMER, J. L., COLOMINA, I., 1994: Digital Photogrammetry at the Institut Cartogràfic de Catalunya. *Photogrammetric Record*, 14(84), 943–954.
- COLOMINA, I., NAVARRO, J., TORRE, M., 1991: Digital Photogrammetric Systems at the ICC. *Digital Photogrammetric Systems*, Wichmann, Karlsruhe, 217–228.
- JAAKKOLA, J., ORAVA, E., 1994: The effect of pixel size on compression on metric quality of digital aerial images. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 30(3/1), 409–416.
- KÖLBL, O., BACH, U., 1994: Tone reproduction of photogrammetric scanners. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 30(1), 150–162.
- KRZYSZEK, P., 1991: Fully automatic measurement of digital elevation models with MATCH-T. *Schriftenreihe des Instituts für Photogrammetrie, Universität Stuttgart*, 15, 205–214.
- NORVELLE, F.R., 1994: Using iterative orthophoto refinements to generate and correct digital elevation models (DEM). *Mapping and Remote Sensing Tools for the 21st Century*, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Washington, DC, 134–142.
- PENNEBAKER, W.B., MITCHELL, J. L., 1993: JPEG still image compression standard. Van Nostrand Reinhold, New York.
- PRADES, A., NUÑEZ, J., PÉREZ, F., PALÀ, V., ARBIOL, R., 1994: Aerial Photography Restoration using the MLE Algorithm. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 30(3/2), 683–688.
- SCHROTH, R., 1992: Why go digital? A management point of view. *Intergraph European Digital Photogrammetry Seminar*.
- TSINGAS, V., 1991: Automatische Aerotriangulation. *Schriftenreihe des Instituts für Photogrammetrie, Universität Stuttgart*, 15, 253–268.
- Anschrift der Verfasser:  
Dr. ISMAEL COLOMINA und JOSEP LLUÍS COLOMER,  
Institut Cartogràfic de Catalunya, Balmes, 209-211,  
E-08006 Barcelona, Spanien
- ISMAEL COLOMINA. Born in 1956. Degree in Applied Mathematics 1982 (Uni. Barcelona), PhD Mathematics 1991 (Uni. Barcelona). Since 1982 has been working in photogrammetry and geodesy at the Institut Cartogràfic de Catalunya where he is currently Head of Geodesy.
- JOSEP LLUÍS COLOMER ALBERICH. Born in 1947. Degree in Physics, 1971–1975. Development of remote sensing software and applications at the Computer Center of the Technical University of Catalunya 1975–1981. Part time lecturer at the Computer Architecture Dept. of the Faculty of Informatics of the University of Catalunya 1977–1985. Head of Research and Development at the Institut Cartogràfic de Catalunya since 1981.

Eingang des Manuskripts: 17. 11. 1994