

Geo- und radiometrische Aufbereitung multi- und hyperspektraler Daten zur Erzeugung langjähriger kalibrierter Zeitreihen

JOACHIM HILL, Trier & WOLFGANG MEHL, Ispra/Italien

Keywords: remote sensing, optical sensor, vicarious calibration, atmospheric correction, geometric rectification, GCP identification

Zusammenfassung: Die Auswertung mittels optischer Erdbeobachtungssatelliten (z. B. Landsat, SPOT, IRS, ASTER, Ikonos oder Quickbird) oder hyperspektraler Flugzeugabtaster über mehrjährige Zeiträume erhobener Bildserien eröffnet einzigartige Möglichkeiten zur Gewinnung qualitativer und quantitativer Informationen zum Umweltzustand bzw. seiner Veränderung. Um derartige Datenreihen oder auch Einzelbefliegungen mit experimentellen Aufnahmesystemen anhand quantitativer Interpretationsansätze zur Bearbeitung umweltbezogener Fragestellungen einsetzen zu können, ist es allerdings nötig, die jeweils unter bestimmten tages- und jahreszeitlichen Bedingungen aufgenommenen Bildmessungen so aufzubereiten, dass sie möglichst den unter Standardbedingungen in Labor oder Gelände erhobenen Vergleichsmessungen entsprechen. Dazu gehören grundsätzlich zwei Verarbeitungsschritte, nämlich die Kompensation der zur Aufnahmezeit herrschenden atmosphärischen Bedingungen und geländebedingter Beleuchtungseffekte sowie die unter operationellen Gesichtspunkten optimierte Georeferenzierung der Bilddaten, die grundsätzlich eine Integration des digitalen Höhenmodells voraussetzt. Derzeit wird in der hier beschriebenen Verarbeitungskette die geometrische Prozessierung aus operationellen Gründen noch der radiometrischen Datenaufbereitung vorangestellt. Letztere schließt auch Werkzeuge zur häufig notwendigen Anpassung der radiometrischen Kalibrierung des jeweiligen Aufnahmesystems ein.

Summary: *Geo- and radiometric pre-processing of multi- and hyperspectral data for the production of calibrated multi-annual time series.* The analysis of multi-annual time series of multi-spectral earth observation satellite data (such as Landsat, SPOT, IRS, ASTER, Ikonos, or Quickbird) or airborne hyperspectral imagery offers unique opportunities for collecting qualitative and quantitative information for assessing and monitoring the state of our environment. The use of quantitative approaches in the analysis of multi- and hyperspectral data, however, requires adequate pre-processing strategies in order to render the imagery comparable to reference measurements from laboratory or field experiments. This involves basically two steps, i. e. the correction of atmospheric contributions to the radiometric signal (including corrections for terrain-induced illumination effects) and the optimised geo-coding of the resulting data sets. Due to operative constraints of the existing implementation, the geometric processing is presently performed prior to the atmospheric correction processing which also includes tools for a vicarious calibration of sensors.

1 Einleitung

Traditionell sind geometrische und radiometrische Korrekturen von Fernerkundungsdaten als getrennte Arbeitsschritte behandelt worden. Neuere Arbeitsansätze zwingen aber gerade zur Integration dieser beiden Prozessierungsbereiche, da die optimierte Korrektur atmosphärischer Einflüsse nur dann erfolgreich durchgeführt werden kann, wenn aus dem digitalen Geländemodell abzuleitende topographische Variablen direkt mit einbezogen werden. Voraussetzung dazu ist eine präzise Georeferenzierung der Bilddaten in Bezug auf das jeweils gültige Koordinatennetz. Die Verarbeitung umfangreicher Datenvolumina bei der Erstellung langjähriger Zeitreihen fordert darüber hinaus möglichst leistungsfähige, flexible und aufeinander abgestimmte Prozessierungswerkzeuge. Der hier entwickelte Korrekturansatz baut auf früheren Arbeiten der Verfasser auf, die im Rahmen mehrerer EU-geförderter Forschungsprojekte (u.a. DeMon, GeoRange) und spezieller Untersuchungen weitergeführt wurden (s. Beiträge von RÖDER et al. sowie UDELHOVEN et al. in diesem Heft).

2 Geometrische Vorverarbeitung

Die geometrische Vorverarbeitung erfordert für jeden auf ein gemeinsames Referenzgitter zu transformierenden Datensatz (Bilder, GIS-Ebenen, Höhenmodell) zwei voneinander unabhängige Schritte: die Bestimmung und Beschreibung von Transformationsparametern und die Anwendung der Transformation durch direkte Berechnung neuer Koordinaten (für Vektordaten z. B. einer GIS-Ebene) oder durch Interpolation (resampling) der Bildwerte in den Positionen des Ausgangsrasters, welche den rücktransformierten Koordinaten des Zielgitters entsprechen (für Rasterdaten); das Transformieren von Rasterdaten erfordert demnach die Bestimmung der inversen Transformation.

In der Regel ist es nicht möglich, ein vollständiges Abbildungsmodell vom bilderfassenden System in eine kartographisch nutzbare Geometrie direkt zu bestimmen; der

Abbildungsprozess ist auf natürliche Weise in Teiltransformationen getrennt (u.a. RICHARDS & JIA 1999), die unterschiedliche Beschreibungsparadigmen erfordern.

Eine potentiell besonders speicherintensive, aber leicht umkehrbare Darstellung ist die Zuordnung von Punkten (ground control points oder GCP) zwischen Ausgangsdaten und Referenzdaten, zu denen das Transformationsergebnis deckungsgleich sein soll. Die Rasterdarstellung einer Transformation kann somit als Spezialfall der GCP-Darstellung gesehen werden, welche als Zweikanalbild (Hochwert- und Rechtswertkanal) mit Angabe von Ursprungskordinaten und Gitterweite kodiert wird. Vorteile gegenüber der allgemeinen GCP-Darstellung sind direkte Adressierung benachbarter Punkte, grössere Speicherökonomie, und die Anwendbarkeit von Bildverarbeitungsalgorithmen, z. B. Resampling für das Verknüpfen zweier Transformationen.

Der manuell aufwändigste Schritt bei der geometrischen Vorverarbeitung ist das Bestimmen von GCP. Für das Referenzieren einer Zeitreihe von Bilddaten hat es sich bewährt, in nur einem Bild GCP bezüglich einer Karte zu bestimmen, und für die übrigen Bilder GCP bezüglich dieses Bildes zu finden. Im ersten Fall müssen solche Objekte auf Bild und Karte verwendet werden, die als Einzelpunkte bestimmbar sind, wie Straßenkreuzungen oder andere Schnittpunkte von linearen Objekten, oder Eckpunkte. In Aufnahmen von natürlichen Landschaften sind solche Objekte nicht immer einfach zu identifizieren; es genügt aber bei der Referenzierung von Bildern gegeneinander, wenn ausgedehnte Objekte mit gleicher Form (Helligkeitsverteilung) in beiden Bildern als deckungsgleich identifiziert werden. Diese Zuordnung kann durch Maximieren der Korrelation zwischen Bildausschnitten, welche solche Objekte enthalten, weitgehend automatisiert werden (u.a. SCHOTT 1997, RICHARDS & JIA 1999). Es wird wie folgt vorgegangen: potentiell deckungsgleiche Objekte werden in Referenz- und Ausgangsbild visuell identifiziert, mit einer groben Zuordnung je eines Punktes (R , A) in

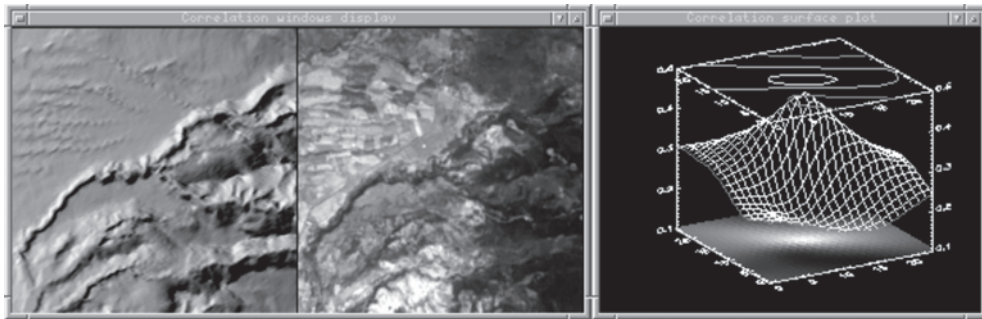


Abb. 1: GCP-Bestimmung mit FINDGCP. Aus Höhenmodell abgeleitetes Beleuchtungsbild: lokale Drehung $11,07^\circ$, Maßstabsfaktor 0,9991, Bildausschnitt 161×161 (links); Bildausschnitt TM-7 Sardinien 21.7.2000, erste Hauptkomponente (Mitte); Korrelationsprofil über 25×25 Positionen (rechts).

beiden Bildern. Drehung und Skalierung zwischen den beiden Abbildungen des Objektes werden abgeschätzt, und ein kleiner Bildausschnitt im Ausgangsbild mit Bildmittelpunkt A entsprechend auf die lokale Geometrie des Referenzbildes transformiert. Für alle Pixelpositionen um R , welche innerhalb eines Suchbereichs (in der Regel ein Quadrat) liegen, wird der Bildausschnitt dem Referenzbild überlagert und die Korrelation mit demselben berechnet; das ergibt einen Korrelationswert für jeden Punkt des Referenzbildes im Suchbereich. Die Pixelposition mit dem höchsten Korrelationswert stellt eine gegenüber R verbesserte Abschätzung der Koordinaten im Referenzbild dar, welche dem Punkt A im Ausgangsbild entsprechen. Durch eine Polynominterpolation höherer Ordnung der Korrelationswerte auf einem verdichteten Gitter im Suchbereich können die Koordinaten auf Subpixelgenauigkeit verbessert werden.

Sobald mindestens drei GCP identifiziert sind, können Rotation und Skalierung aus den vorhandenen GCP abgeschätzt, und ungefähre Koordinaten im Ausgangsbild aus zugehörigen Koordinaten im Referenzbild (und umgekehrt) hergeleitet werden. Ein visueller Vergleich zwischen Referenz- und Ausgangsbild dient dann nur zur Beurteilung der Ähnlichkeit von gleichliegenden Objekten in den beiden Bildern, und damit der Signifikanz der Korrelation; weitere Beurteilungskriterien sind der Betrag des ma-

ximalen Korrelationskoeffizienten, und die visualisierte Verteilung der Korrelationskoeffizienten im Suchbereich.

Das Verfahren ist auch für die Koregistrierung eines Bildes, welches Reliefinformation gut darstellt (z. B. eine geeignete Komponente einer Hauptachsentransformation) und einer aus dem Höhenmodell abgeleiteten Reliefdarstellung anwendbar (Abb. 1); letztere liegt oft schon in Kartenprojektion vor. Zusammen mit einigen Zusatzmodulen zur Verarbeitung von Transformationen in GCP- und Rasterdarstellung wurde dieses Verfahren zur weitgehend automatisierten Bearbeitung langer Zeitserien in der Sprache IDL (Interactive Data Language) implementiert (Programmpaket FINDGCP/GEO) und erfolgreich auf Bilddaten verschiedener Systeme (TM, RESURS, AVHRR, VEGETATION) oder auch zur Koregistrierung von Daten mit deutlich verschiedener räumlicher Auflösung angewendet. Die gegenwärtige Implementierung ermöglicht das Invertieren von Transformationen in Rasterdarstellung allerdings nur für speicherresidente Daten und ist daher typischerweise noch nicht für die operationelle Behandlung von Rastern mit mehr als 3000×3000 Bildpunkten geeignet.

Zur Behandlung reliefbedingter Bildeigenschaften wurden spezifische Module entwickelt, die sowohl zur präzisen geometrischen Rektifizierung umfangreicher EOS-Datenserien als auch zu deren radiometri-

scher Aufbereitung benötigt werden. Während zur Kompensation der perspektivischen Verzerrungen in räumlich hoch aufgelösten Satellitendaten nur die Relieffhöhe benötigt wird¹, werden mit dem in der Sprache C (ANSI) geschriebenen Programm HZ zur radiometrischen Korrektur die Illuminationsparameter $\cos \gamma$, $\cos \nu$, $\sin \eta$, ϕ , und Σ aus einem digitalen Geländemodell berechnet, wobei γ dem Winkel zwischen Flächennormaler und Einstrahlungsrichtung, ν dem Zenithwinkel der Flächennormalen (Flächenneigungswinkel), η der Sonnenhöhe über dem Horizont, ϕ dem Azimutwinkel der Flächennormalen und Σ der Abschätzung der Himmelskalotte (in %) über dem Horizont entspricht (HILL et al. 1995).

Der Parameter $\cos \gamma$ bestimmt die direkte und die anisotrope diffuse Einstrahlung, $\sin \eta$ wird zum Bestimmen einer Schattenmaske (Flächen ohne direkte und anisotrope diffuse Einstrahlung) verwendet, Σ bestimmt die isotrope diffuse Einstrahlung und wird durch Abschätzung der Horizonthöhe in 16 Richtungen berechnet. Da für die Bestimmung von η und Σ für jeden Punkt des Höhenmodells eine Suche über Profile erforderlich ist, wird das Höhenmodell voll in den Arbeitsspeicher übernommen; dies erleichtert es, HZ um weitere Funktionen zu erweitern, wie z. B. um die Berechnung von Parametern zur perspektivischen Geometriekorrektur oder weiteren Relief beschreibenden Größen.

¹ Bislang wurde die Korrektur perspektivischer Verzerrung als separater Schritt unter Verwendung kommerzieller Software durchgeführt (ERDAS ImagineTM, ENVITM); für die Behandlung von Flugzeugdaten, die mit GPS-Information sowohl auf der Messplattform als auch in Bodenkontrollpunkten und mit Messungen eines inertialen Navigationssystems verankert waren, kam auch erfolgreich das Paket „PARGETM“ (SCHLÄPFER et al. 1998) zum Einsatz, welches das Verknüpfen und Invertieren von Transformationsdarstellungen erlaubt.

3 Radiometrische Datenaufbereitung

Während bei radiometrischen Messungen im Labor die spektrale Reflexion unmittelbar durch die entsprechenden Eigenschaften des Objektes geprägt wird, werden Strahlungsmessungen im Falle eines abbildenden Fernerkundungssystems durch die Wirkung der zwischen Objekt und Sensor liegenden Atmosphäre stark beeinträchtigt. Um zur Bearbeitung umweltbezogener Fragestellungen auch quantitative Interpretationsansätze einsetzen zu können, wurde, auf den eingangs beschriebenen geometrischen Verarbeitungskonzepten aufbauend, im Zuge mehrerer EU-Projekte (siehe dazu den Beitrag von RÖDER et al. in diesem Heft) ein Korrektur- und Modellierungswerkzeug entwickelt (AtCPro[®]), das zur operationellen Atmosphärenkorrektur multi- und hyperspektraler Bilddatensätze und Zeitreihen (0.35–2.55 μm) einzusetzen ist (HILL & STURM 1991, HILL, MEHL & RADELOFF 1995, HILL 2002). Ausgehend von der Beziehung zwischen gemessener Strahldichte (L) und der Gesamtreflexion am Aufnahmesystem (planetarische Albedo)

$$\rho^* = \frac{\pi L}{E_0 \cos \theta},$$

die bei Kenntnis der radiometrischen Kalibrierungskonstanten unter Berücksichtigung von Aufnahmezeitpunkt und -ort stets berechnet werden kann, baut AtCPro[®] im Kern auf der Formulierung des Strahlungstransfers nach TANRÉ et al. (1990) auf, nach der die Beziehung zwischen ρ^* und der eigentlichen Objektreflexion ρ_t wie folgt beschrieben wird:

$$\rho^* = T_{gas} \downarrow \uparrow \cdot \left\{ \rho_{at} + \frac{T \downarrow \cdot [t_d \uparrow \cdot \rho_t + t_s \uparrow \cdot \langle \rho \rangle]}{1 - \langle \rho \rangle \cdot s} \right\}$$

Da diese Beziehung nach ρ_t aufzulösen ist, gestattet sie die atmosphärenkorrigierte Ableitung der bidirektionellen Reflexionseigenschaften eines Objektes aus den multispektralen Messungen eines fernerkundlichen Aufnahmesystems. Die dazu notwen-

dige Parametrisierung der atmosphärischen Eigenschaften ist im Wesentlichen in den Transmissionskoeffizienten

$T \downarrow$	abwärts gerichtete, streubedingte atmosphärische Gesamttransmission (direkt + diffus)
$t_d \uparrow$	aufwärts gerichtete, streubedingte direkte atmosphärische Transmission
$t_s \uparrow$	aufwärts gerichtete, streubedingte diffuse atmosphärische Transmission
$T_{gas} \downarrow \uparrow$	gesamte absorptionsbedingte Gas-Transmission

enthalten, die aus Messungen der atmosphärischen optischen Dicke τ oder unter bestimmten Voraussetzungen auch aus einer Analyse der Fernerkundungsdaten selbst abzuleiten sind (u.a. ROYER et al. 1988, KAUFMANN & SENDRA 1987). Mit s wird dabei die sphärische Albedo, mit $\langle \rho \rangle$ der diffus in den Beobachtungspfad hineingestreuete Reflexionsanteil der Objektumgebung bezeichnet (auf eine detailliertere Beschreibung muss an dieser Stelle verzichtet werden).

Als Eingangsgröße zur Charakterisierung des Streuverhalten der Atmosphäre wird in dem hier gewählten Modellansatz ausschließlich die durch Aerosole bestimmte optische Dicke τ_a benötigt, wobei alle weiteren Steuergrößen aus τ_a abgeleitet werden (TANRÉ et al. 1990). AtCPro[®] verfügt über ein spezielles Modul zur Schätzung von τ_a anhand dunkler, im Bilddatenbestand enthaltener Objekte (vorzugsweise Wasserflächen); alternativ kann τ_a auch direkt eingegeben werden. Die höhenabhängige Skalierung der Modellparameter (u.a. ZIBORDI & MARACCI 1993) erlaubt sowohl die Berücksichtigung der Flughöhe des Aufnahmesystems (für flugzeuggetragene Sensoren) als auch der Geländehöhe (angemessene Behandlung von Szenen mit großen Höhendifferenzen).

Abgesehen davon, dass die Festlegung von Spektralkanälen und ihrer Bandbreite bei operationellen Aufnahmesystemen generell so vorgenommen wird, dass nur eine möglichst geringe Beeinflussung durch op-

tisch wirksame atmosphärische Gase erfolgt, sind deren wellenlängenabhängige Absorptionseigenschaften zumeist gut dokumentiert bzw. können mit Hilfe spezieller Modelle für grundlegende Standardsituationen berechnet werden (z.B. MODTRAN, BERK et al. 1999). Unterliegen sie keinen allzu großen raumzeitlichen Veränderungen (O_3 , CO_2 , O_2 , CH_4), ist ihre Wirkung anhand dieser Tabellen angemessen zu berücksichtigen. Dies gilt auch für horizontal, vertikal oder auch zeitlich hochvariable Gaskonzentrationen (H_2O), solange man mit operationellen Aufnahmesystemen arbeitet, deren Spektralkanäle innerhalb der eigentlichen atmosphärischen Transmissionsfenster positioniert sind. Bei Hyperspektralsensoren, die durch kontinuierliche Sequenzen von Spektralkanälen gekennzeichnet sind, eröffnet gerade die Verfügbarkeit ausreichend schmaler (nur 5–20 nm breiter) Spektralkanäle in spezifischen Absorptionsbereichen die Möglichkeit zur räumlich differenzierten Abschätzung derartiger Gaskonzentrationen und damit zur Korrektur der durch sie verursachten Effekte.

AtCPro[®] wurde jüngst durch ein Korrekturmodul ergänzt, das aus dem Verhältnis der Gesamtreflexion ρ^* im Zentrum der H_2O -Absorptionsbande bei 0.94 und 1.14 μm und der erwarteten, mittels linearer Interpolation zu ermittelnden Objektreflexion ρ_{int}^* für jedes Pixel auf tabellierte, mit Hilfe von Modtran4 (BERK et al. 1999) errechnete Wasserdampfkonzentrationen [g/cm^2] rückschließt (Abb. 2) und diese in einem anschließenden Berechnungsdurchgang zur Atmosphärenkorrektur mit einem optimal angepassten H_2O -Transmissionsspektrum nutzt (HILL 2002).

Die gewonnenen Reflexionsspektren von Oberflächen werden in bewegtem Gelände durch topographisch bedingte Beleuchtungs- und Abschattungseffekte überlagert, die eine quantitative Interpretation der erfassten Oberflächeneigenschaften weiterhin erschweren (u.a. ITTEN et al. 1992) Aufbauend auf früheren Arbeiten (HILL et al. 1995) kann AtCPro[®] unter Einbindung der mit den eingangs vorgestellten geometrischen Prozessierungsmodulen (HZ) erzeug-

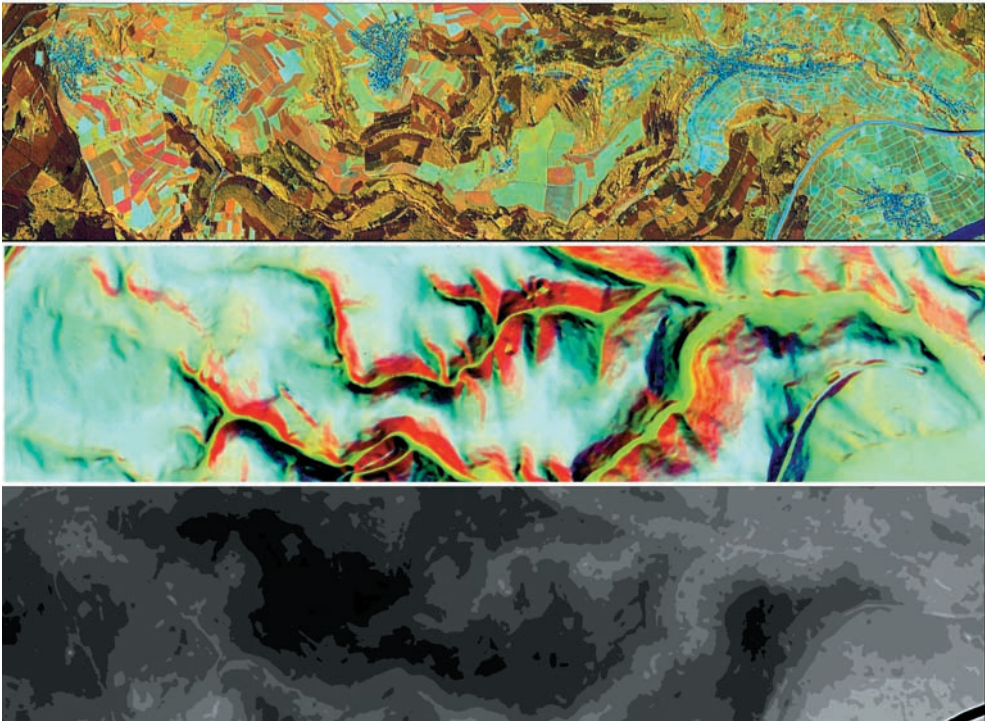


Abb. 2: Atmosphären- und illuminationskorrigierter Datensatz des HyMap Hyperspektralscanners (oben), ein in Abtastgeometrie dargestelltes Farbkomposit der Geländevariablen $\cos \gamma$, $\sin \eta$ und Σ in RGB (Mitte), aus kalibrierten Strahldichtewerten geschätzte Wasserdampfkonzentration [1.0–2.5 g/m³], wobei helle Grautöne höheren H₂O-Konzentrationen entsprechen (unten).

ten Geländevariablen im Rahmen der atmosphärischen Korrektur auch eine Kompensation der reliefbedingten Beleuchtungseffekte erzielen (Abb. 2). Die direkte Einbindung einer Illuminationskorrektur in die atmosphärische Korrektur, d. h. die Ermittlung der illuminationskorrigierten Objektreflexion (ρ_i^{\sim}) an Stelle von ρ_i , ist zu bevorzugen, weil gemäß

$$\rho_i^{\sim} = E_g \cdot \rho_i / E_i^{\sim}$$

die zur notwendigen Berechnung der Globalstrahlung auf einem geeigneten Gelände-segment (E_g^{\sim}) erforderliche Parametrisierung unter Berücksichtigung der bereits verfügbaren direkten und diffusen Transmissionskoeffizienten für unterschiedliche topographische Situationen (nicht beschattet, im Eigenschatten, im Schlagschatten ande-

rer Reliefelemente) differenziert erfolgen kann (HILL et al. 1995); die Globalstrahlung auf einem horizontalen Gelände-segment E_g wird in AtCPro[®] sowieso standardmäßig ermittelt. Ergänzend wurde der bislang unter AtCPro[®] implementierte Lösungsansatz dahingehend erweitert, dass das Verhalten von Oberflächen, die nicht als diffus im Sinne eines lambertschen Reflektors zu betrachten sind, durch die Spezifizierung geeigneter Minnaert-Konstanten (u. a. ITTEN et al. 1992) behandelt werden kann.

4 Perspektiven

Das nächste Implementierungsziel von FINDGCP/GEO ist die Erzeugung, Verknüpfung, Invertierung und Anwendung von komplexen Transformationen, um die Bildobjekte von Zeitreihen operationell mit

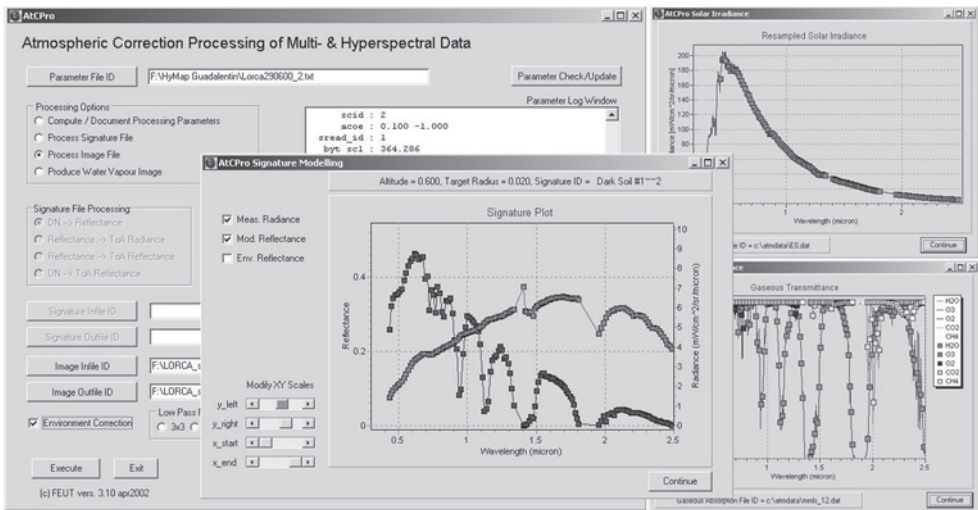


Abb. 3: Verarbeitung spektraler Signaturen des HyMap Hyperspektralscanners mit AtCPro 3.1: der Signaturplot zeigt die gemessene spektrale Strahlendichte eines Objektes im Vergleich zum berechneten Reflexionsspektrum.

einem einzigen Resampling-Schritt für jedes Einzelbild zu georeferenzieren. ATMOD, HZ, und das Paket FINDGCP/GEO sind als Entwicklungspakete zwar noch nicht hinreichend dokumentiert, können aber auf Anfrage zur Verfügung gestellt werden.

Eine Validierung der radiometrischen Korrekturverfahren wurde mit positiven Ergebnissen bereits in früheren Publikationen der Autoren (u. a. HILL, MEHL & RADELOFF 1995, HILL 2002) vorgelegt. Die hier beschriebene Verknüpfung von Vorverarbeitungsschritten ist unter anderem im EU-Projekt DeMon-II eingesetzt worden. Im Nachfolgeprojekt GeoRange (s. RÖDER et al. in diesem Heft) wurden für drei Untersuchungsgebiete insgesamt bereits 35 Landsat-TM-Szenen umfassende Datenserien erfolgreich geometrisch und radiometrisch aufbereitet; daneben wurden zahlreiche Hyperspektraldatensätze (u. a. HyMap und DAIS) bearbeitet.

Die derzeitige, für Windows-basierte PC-Systeme unter Delphi6 implementierte Version von AtCPro[®] 3.1 (Abb. 3) steht konzeptionell in einer Linie mit den Ansätzen von RAHMAN & DEDIEU (1994) oder auch RICHTER (1997). AtCPro[®] berechnet aus ge-

messenen Grauwerten bzw. Strahlendichten folgende Größen:

- Bidirektionelle Reflexion (ρ_l)
- Gesamtreflexion (ρ^*) am Sensor
- Wasserdampfkonzentration (Hyperspektraldaten mit Kanälen bei 0.94 und 1.14 μm erforderlich)

Die Berechnung der Reflexionswerte erfolgt optional unter Berücksichtigung des sogenannten Umgebungseffekts; ist ein digitales Geländemodell geeigneter Auflösung verfügbar, kann optional die Illuminationskorrektur integriert werden. Ausgehend von gemessenen bzw. modellierten Reflexionsspektren ($\rho_{l,mod}$) kann AtCPro[®] ebenfalls die am Sensor zu erwartende Gesamtreflexion (ρ^*) unter Berücksichtigung weitestgehend frei wählbarer Atmosphärenzustände simulieren; alle Berechnungen können unter Berücksichtigung von Gelände- und Flughöhe des Aufnahmesystems grundsätzlich für Spektralsignaturen (Ascii-) und Bilddaten (ERDAS 7.5- und ENVI bsq/bil-Format) durchgeführt werden. Eine „in-flight“-Kalibrierung von Aufnahmesystemen ist bei verfügbaren Referenzmessungen (ρ_l, t_d) möglich.

Derzeit führt AtCPro[®] alle Berechnungen für Nadirbeobachtung durch; die nächste Ausbaustufe wird optional die Berücksichtigung variabler Beobachtungswinkel gestatten. AtCPro[®] wird mit Abschluss der schriftlichen Dokumentation (Nutzeranleitung) demnächst frei verfügbar sein (s. <http://www.feut.uni-trier.de:8080/>). Eine experimentelle Version (ATMOD) des gleichen Ansatzes ist unter IDL implementiert; dieses Paket berücksichtigt bereits Variationen in Einstrahlungs- und Beobachtungsgeometrie, ermöglicht aber gegenwärtig noch nicht die Abschätzung der Wasserdampfkonzentrationsverteilung aus Bilddaten. Ein regelmäßiger Abgleich von Modellrechnungen zwischen AtCPro[®] und ATMOD erlaubt es, beide Pakete konsistent weiterzuentwickeln.

Literatur

- BERK, A., ANDERSON, G.P., ACHARYA, P.K., CHETWYND, J.H., BERNSTEIN, L.S., SHETTLE, E.P., MATTHEW, M.W. & ADLER-GOLDEN, S.M., 1999: MODTRAN4 user's manual, Hanscom AFB, MA 01731-3010: Air Force Research Laboratory, Space Vehicles Directorate, Air Force Materiel Command.
- HILL, J. & STURM, B., 1991: Radiometric correction of multitemporal Thematic Mapper data for use in agricultural land-cover classification and vegetation monitoring. – *International Journal of Remote Sensing*, **12**: 1471–1491.
- HILL, J., MEHL, W. & RADELOFF, V., 1995: Improved forest mapping by combining corrections of atmospheric and topographic effects. – In: ASKNE, J. (ed.): *Sensors and environmental applications of remote sensing*. – Proc. 14th EAR-SeL Symposium, Göteborg, Sweden, 6–8 June 1994, 143–151, A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield.
- HILL, J., 2002: Sensorkalibration und atmosphärische Korrektur von hyperspektralen Fernerkundungsdaten (HyMap). – In: Müller, P., Rumpf, S. & Monheim, H. (Hrsg.): *Umwelt und Region: Aus der Werkstatt des Sonderforschungsbereichs 522*. – 163–173, Selbstverlag, Trier.
- ITTEN, K.I., MEYER, P., KELLENBERGER, T., LEU, R., SANDMEIER, S., BITTER, P. & SEIDEL, K., 1992: Correction of topography and atmosphere on Landsat-TM forest mapping of alpine regions. – *Remote Sensing Series*, vol. **18**, (University of Zurich: Zurich, Switzerland).
- KAUFMAN, Y.C. & SENDRA, C., 1988: Algorithm for automatic atmospheric correction to visible and near-IR satellite imagery. – *International Journal of Remote Sensing*, **9**: 1357–1381.
- RAHMAN, H. & DEDIEU, G., 1994: SMAC: A simplified method of atmospheric correction of satellite measurements in the solar spectrum. – *International Journal of Remote Sensing*, **15**: 123–143.
- RICHARDS, J.R. & JIA, X., 1999: *Remote sensing digital image analysis*. – Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- RICHTER, R., 1997: Correction of atmospheric and topographic effects for high spatial resolution satellite imagery. – *International Journal of Remote Sensing*, **18**: 1099–1111.
- ROYER, A., CHARBONNEAU, L. & TEILLET, P.M., 1988: Interannual Landsat-MSS reflectance variations in an urbanized temperate zone. – *Remote Sensing of Environment*, **24**: 423–446.
- SCHLAEPFER, D., SCHAEPMANN, M. & ITTEN, K., 1998: PARGE: Parametric geocoding based on GCP-calibrated auxiliary data. – *SPIE Int. Symp. On Opt. Sc., Eng. And Instr.*, San Diego (CA), 334–444.
- SCHOTT, J.R., 1997: *Remote sensing – the image chain approach*. – Oxford University Press, New York, Oxford.
- TANRÉ, D., DEROO, C., DUHAUT, P., HERMAN, M., MORCRETTE, J.J., PERBOS, J. & DESCHAMPS, P.Y., 1990: Description of a computer code to simulate the signal in the solar spectrum: the 5S code. – *Int. J. Remote Sens.*, **11** (4): 659–668.
- ZIBORDI, G. & MARACCI, G., 1993: Reflectance of antarctic surfaces from multispectral radiometers: the correction of atmospheric effects. – *Remote Sensing of Environment*, **43**: 11–21.

Anschriften der Autoren:

Prof. Dr. rer. nat. JOACHIM HILL, Abteilung Fernerkundung, Universität Trier, D-54286 Trier, Tel. + 49-651-2014592, Fax + 49-651-2013815, email: hillj@uni-trier.de

WOLFGANG MEHL, Institute for Environment and Sustainability, Soil and Waste Unit, European Commission, Joint Research Centre, I-21020 Ispra (Va), Italien, Tel. + 39-0332-789072, Fax + 39-0332-789803, email: wolfgang.mehl@jrc.it

Manuskript eingereicht: November 2002

Angenommen: November 2002