

Geometrische Korrekturen: Vom Flugzeugscanner zur Nahbereichskamera

MARTIN SCHEELE, ANKO BÖRNER, RALF REULKE & KARSTEN SCHEIBE, Berlin

Zusammenfassung: Die im Laufe der letzten Jahre entwickelten Verfahren zur Korrektur fluglagebedingter Störungen von CCD-Zeilen – Stereoluftbildkameras lassen sich zu geometrischen Transformationen von Panoramaaufnahmen, die durch rotierende Optiken oder rotierende CCD-Zeilenkameras entstanden sind, effektiv anwenden. Diese Transformationen erlauben, in Äquivalenz zu einer virtuellen Matrixkamera, den Übergang zur zentralperspektiv Darstellung der Bilder. Dabei können 360° Abbildungen von Böden und Decken in zentralperspektivische Draufsichten überführt werden. Auch die bei Bildtransformationen notwendigen Resamplingprozesse können ohne Modifizierung aus der digitalen Luftbildtechnik übernommen werden.

Summary: *Geometrical Corrections: From photogrammetric airborne scanners to close-range cameras.* In the last few years algorithms for the geometrical correction of airborne linescanner imagery have been developed, which compensate the influence of the flight motion of the airplane. This paper shows the equivalence between the geometrical correction of images of airborne CCD-linescanners and important transformations of images of CCD-panorama-linescanner. The resampling process of panorama images can be executed the same way as for CCD-airborne-linescanner images.

Einleitung

Wie aus zahlreichen Veröffentlichungen (BÖRNER et al. 1996, HAALA et al. 1997, WEWEL et al. 1999) zu ersehen, wurden in den letzten Jahren mehrere CCD-Zeilenkameras flugzeuggestützt eingesetzt. Dabei hat sich, was die Datenverarbeitung betrifft, ein gewisser Standard herauskristallisiert. Da diese Kameras, im Vergleich zu den Versuchen der 80er Jahren, mit hochgenauen Lagemesssystemen gekoppelt sind, können jeder Bildzeile die Parameter der äußeren Orientierung zugeordnet werden. Die damit mögliche Kompensation der Fluglage-schwankungen in den Bilddaten ist ein solcher erster standardisierter Verarbeitungsschritt, der stets mit einer Form der Bildinterpolation gekoppelt werden muss. CCD-Zeilenkameras werden auch als Spezialkameras (Studiokameras) auf der Erde eingesetzt. Hierbei wird in der Bildebene die

CCD-Zeile in präziser Weise bewegt, wodurch das Objekt abgebildet wird. Wie z. B. in (REULKE & SCHEELE 1997, Jugend forscht 1998, LUHMANN 2000) gezeigt und jetzt auch kommerziell erhältlich (innotech, u. a.), können mittels einer rotierenden CCD-Zeilenkamera hochauflösende Bilder von unbewegten Objekten erzeugt werden. LISOWSKI & WIEDEMANN 1998 wiesen nach, dass solche Kameras für die Stereoauswertung einsetzbar sind. Insbesondere Panoramaaufnahmen, einschließlich 360° Rundumaufnahmen, lassen sich durch diese Aufnahmetechnik herstellen. Die so gewonnenen Bilder besitzen eine von Zentralperspektiv-Bildern abweichende Geometrie. Ihre Bildkoordinaten sind im Allgemeinen Koordinaten eines Kegelstumpfes, speziell eines Zylindermantels. Die Betrachtung solcher Bilder entspricht nicht den Sehgewohnheiten der Zentralperspektive. Mittels der Al-

gorithmen, die bei der Korrektur der fluglagegestörten Bilder von flugzeuggesteuerten CCD-Zeilenkameras zum Einsatz kommen, können diese Bilder effektiv in äquivalente Bilder mit Zentralperspektive transformiert werden. Dabei lassen sich auch Verfahren der Bildinterpolation, wie sie eben bei der Bearbeitung der Flugzeugscannerdaten genutzt werden, zur Anwendung bringen.

1 Geometrische Transformationen (Lagekorrektur)

In Abb. 1 ist die für die geometrische Korrektur von Luftbildscannerdaten typische Situation beschrieben. Die sich daraus ergebende Ausgangsgleichung hat die Gestalt:

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + t \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{r}_d \quad (1)$$

- \mathbf{r} – Position des Objektpunktes mit $\mathbf{r} = (x, y, z)^T$
- \mathbf{r}_0 – Position der Kamera mit $\mathbf{r}_0 = (x_0, y_0, z_0)^T$
- t – Maßstabsparameter
- \mathbf{A} – Rotationsmatrix, Elemente $a_{11} \dots a_{33}$ beinhalten die Roll-, Nick- und Gierwinkel
- \mathbf{r}_d – Position des Pixels in der Fokalebene mit $\mathbf{r}_d = (0, y_d, -f)^T$

Wir beschränken uns hier auf den Fall, dass die CCD-Zeile mittig in der Bildebene angeordnet ist und die Brennweite f sei. Das

Koordinatensystem der Kamera ist so definiert, dass die Zeile in der y -Achse liegt und die Bildebene eine x - y -Ebene ist. Damit entspricht der Scanwinkel dem Nickwinkel (θ) und eine Neigung der optischen Achse dem Rollwinkel (ϕ) des Flugzeuges. Das Gieren, äquivalent einer in der Bildebene verdrehten CCD Zeile, ist auf Grund der Kalibrierung der Kameras von untergeordneter Bedeutung. In Anlehnung an Gleichung (1) lautet die Abbildungsgleichung für die Panoramaaufnahme:

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + t \cdot \mathbf{A}(\phi_2) \cdot \mathbf{A}(j \cdot \Delta\theta) \cdot \mathbf{A}(\phi_1) \cdot \mathbf{r}_d \quad (2)$$

Die Winkel ϕ_1, ϕ_2 unterscheiden die Rollbewegung dahingehend, ob sie vor oder nach der Nickbewegung (Scandrehung) erfolgt. Bequemerweise legt man den Koordinatenursprung in das Projektionszentrum der Kamera, damit ist \mathbf{r}_0 ein Nullvektor. Die Kamera ist so justiert, dass die Rotationsachse der Scanbewegung ebenfalls durch das Projektionszentrum geht. $\Delta\theta$ ist das Winkelinkrement, bestimmt aus Pixelgröße und Brennweite, und j der Zeilenindex. Das Ortskoordinatensystem sei so gewählt, dass die y -Achse senkrecht zum Boden steht. Im Falle von $\phi_1 = \phi_2 = 0$ und $j = 0$ fällt die optische Achse mit der z -Achse zusammen. Folgende Spezialfälle von Panoramaaufnahmen lassen sich nach Gleichung (2) unterscheiden:

1.1 Horizontale Panoramaaufnahme

$$\Phi_1 = \Phi_2 = 0$$

$$\mathbf{r} = t \cdot \mathbf{A}(j \cdot \Delta\theta) \cdot \mathbf{r}_d \quad (3)$$

$$\mathbf{A}(j \cdot \Delta\theta) = \begin{bmatrix} \cos(j \cdot \Delta\theta) & 0 & -\sin(j \cdot \Delta\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(j \cdot \Delta\theta) & 0 & \cos(j \cdot \Delta\theta) \end{bmatrix} \quad (4)$$

Für einen Scanbereich $|j_{\min} - j_{\max}| \cdot \Delta\theta < \pi$ liefert der Algorithmus der Fluglagekorrektur (Korrektur des Nickens eines ‚Stillstehendes Flugzeuges‘) den Übergang von Zylinderkoordinaten in kartesische Koordinaten. Der Vektor im Objektraum \mathbf{r} hat bei Berücksichtigung der projizierten Pixelgröße Δ :

$$\Delta = \frac{z}{f \cdot \delta} \quad (5)$$

wobei δ die Pixelgröße des Sensors ist, die Koordinaten $\mathbf{r} = (j' \cdot \Delta, i' \cdot \Delta, z)^T$. Die y -Koordinate des Bildvektors \mathbf{r}_d ist $y_d = i \cdot \delta$. Mit

$$t = \frac{z}{f \cdot \cos(j \cdot \Delta\theta)} \quad (6)$$

besitzt das transformierte Bild folgende Koordinaten:

$$j' = \frac{f}{\delta} \cdot \tan(j \cdot \Delta\theta) \quad (7)$$

$$i' = \frac{i}{\cos(j \cdot \Delta\theta)} \quad (8)$$



Abb. 2: 140° Panoramaaufnahme.



Abb. 3: Transformierte Panoramaaufnahme von Abb. 2.

Zu diesem Ergebnis gelangt man auch, wenn man die Projektionsgleichungen für die Transformation von einer Zylindermantelfläche auf eine dazugehörige Tangentialebene ableitet. Die Transformation (4) lässt sich auch für digitalisierte Panoramafotos, die mittels rotierender Optiken gewonnen wurden, anwenden. Ein Beispiel ist mit Abb. 2 und Abb. 3 gegeben.

1.2 Verkipppte Panoramaaufnahme

$$\phi_1 = 0, \phi_2 \neq 0$$

In diesem Falle ist die Rotationsachse gegenüber der raumfesten y -Achse um den Winkel θ_2 geneigt. Hier entspricht die Transformation in ein kartesisches Koordinatensystem der Fluglagekorrektur eines stillstehenden, nickenden und zur Seite rollenden Flugzeuges. Drehachse und optische Achse sind dabei wie im Kapitel 1.1 orthogonal. Analog zum Vorgehen im Abschnitt 1.1 er-

geben sich für das transformierte Bild folgende Koordinaten:

$$j' = \frac{f \cdot \sin(j \cdot \Delta\theta)}{\delta \cdot N} \quad (9)$$

$$i' = \frac{f \cdot (i \cdot \delta \cdot \cos\phi_2 - \cos(j \cdot \Delta\theta) \cdot \sin\phi_2)}{\delta \cdot N} \quad (10)$$

$$N = i \cdot \delta \cdot \sin\phi_2 + f \cdot \cos(j \cdot \Delta\theta) \cdot \cos(\phi_2) \quad (11)$$

1.3 Kegelpanorama $\phi_1 \neq 0, \phi_2 = 0$

Die optische Achse ist gegenüber der raumfesten y -Achse um ϕ_1 geneigt. Im Gegensatz zu 1.2 ist die Drehachse raumfest und parallel zur raumfesten y -Achse, d. h. Drehachse und optische Achse sind nicht mehr orthogonal zueinander. Das Bild entsteht in Kegel- oder Kegelmantelflächenkoordinaten. Die Analogie zur Luftbildaufnahme ist wie zu



Abb. 4: 90° Scan vom Neuen Palais, $\phi_2 = 5^\circ$, 6200 × 21000 Pixel.



Abb. 5: Transformierte Panoramaaufnahme von Abb. 4.



Abb. 6: 270° Scan im Neuen Museum Berlin, 5 184 × 14 544 Bildpunkte.

1.2, nur dass die Nick- und die Rollbewegung in der Reihenfolge vertauscht sind. Die Drehachse ist raumfest. Auch hier führen die Algorithmen der Fluglagekorrektur zu einer Transformation der Bildkoordinaten in ein kartesisches Koordinatensystem, was mit einer zentralperspektiven Sicht verknüpft ist.

$$j' = \frac{f}{\delta} \cdot \tan(j \cdot \Delta\theta) \quad (12)$$

$$i' = \frac{f}{\delta} \cdot \frac{i \cdot \delta \cdot \cos \phi_1 - f \cdot \sin \phi_1}{-i \cdot \delta \cdot \sin \phi_1 - f \cdot \cos \phi_1} \cdot \frac{1}{\cos(j \cdot \Delta\theta)} \quad (13)$$

Abb. 7 zeigt eine Anwendung dieser Transformation. Mit einer um 35° geneigten Kamera (SANDAU & ECKARDT 1996) wurde im Neuen Museum zu Berlin ein 270° Scan vorgenommen (Abb. 6 zeigt das untransformierte Bild).

Der hier diskutierte Fall kann auch eine sehr praktische Anwendung bei der Aufnahme von Ebenen, z. B. Decken und Böden, finden. Unter dieser Annahme besitzt der Ortsvektor $\vec{r} = (j' \cdot \delta, h, i' \cdot \delta)$, wobei h für die Entfernung Kamera zur aufzunehmenden Ebene steht. In Abänderung zur Gleichung (5) ist $\Delta = h/(f \cdot \delta')$, wobei δ' eine mittlere, virtuelle Bildpixelgröße ist, mit deren Hilfe die gewünschte Rasterung der abzubildenden Ebene festgelegt werden

kann. Die Transformationsgleichungen ergeben sich damit zu:

$$j' = Q \cdot \sin(j \cdot \Delta\theta) \cdot (i \cdot \delta \cdot \sin \phi_1 + f \cdot \cos \phi_1) \quad (14)$$

$$i' = Q \cdot \cos(j \cdot \Delta\theta) \cdot (-i \cdot \delta \cdot \sin \phi_1 - f \cdot \cos \phi_1) \quad (15)$$

$$Q = \frac{f}{\delta' \cdot (i \cdot \delta \cdot \cos \phi_1 - f \cdot \sin \phi_1)} \quad (16)$$



Abb. 7: Rechte Hälfte von Abb. 6 transformiert.

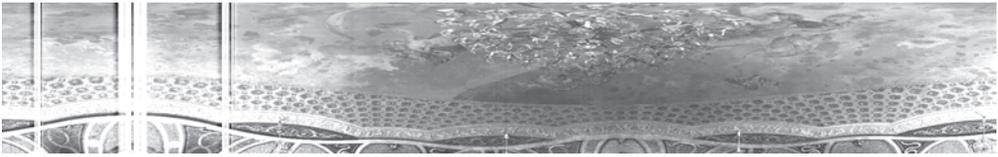


Abb. 8: 360° Scan der Decke des Grottsaals, 5 184 × 20 000 Bildpunkte, optische Achse 35° geneigt.

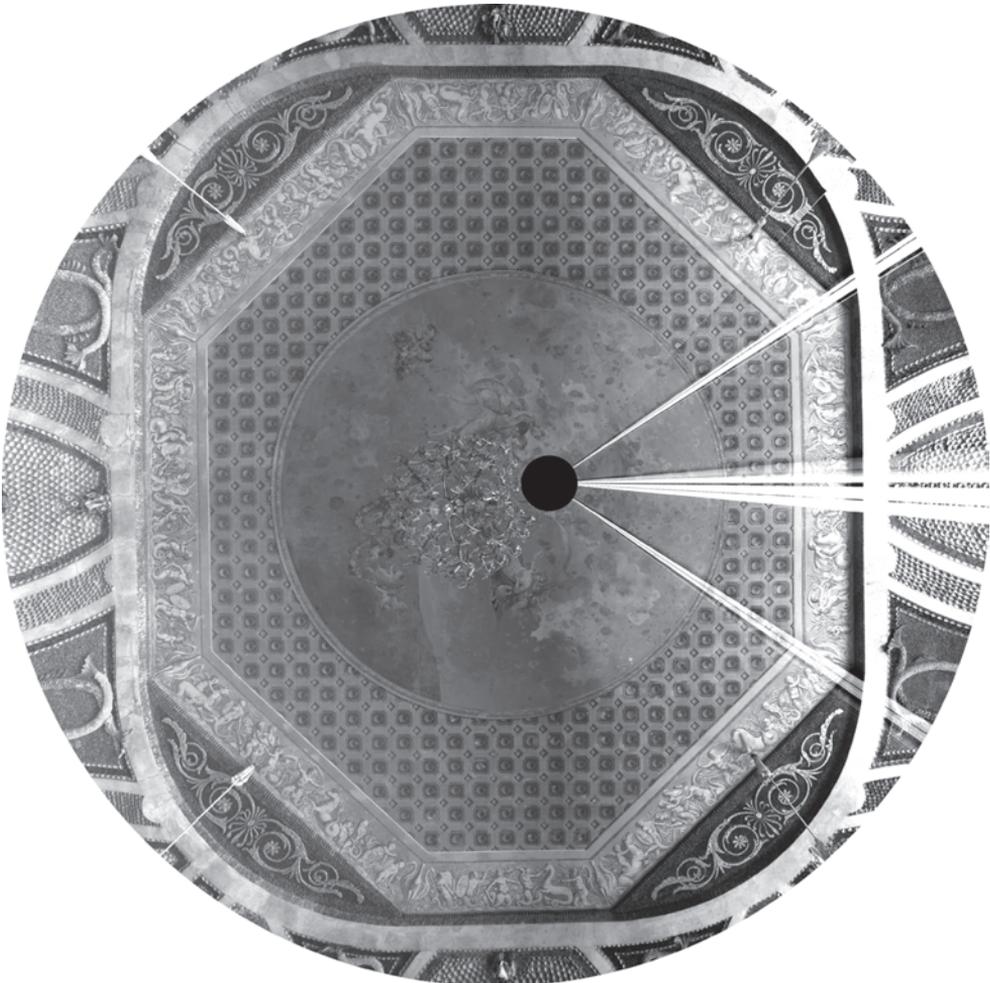


Abb. 9: Transformierte Abb. 8, 4 650 × 4 650 Bildpunkte.

Der Abstand h der Ebene zur Kamera in Abhängigkeit von der Brennweite f muss so groß sein, dass die Abbildungsgleichung (1) gilt. Diese Forderung basiert darauf, dass der Abstand der Bildebene vom Haupt-

punkt der Optik bei den eingesetzten Kameras fest ist, nämlich gleich der Brennweite f . In Abb. 8 ist der 360° Scan mit Hilfe von WAAC von der Decke des Grottsaales im Neuen Palais zu Potsdam wiedergegeben.

Die hellen Stellen sind eine Folge des nicht unterdrückten Blooming, welches im Fensterbereich durch Sättigung der CCD entstand. Die Abb. 9 zeigt das Ergebnis der Transformation nach den Gleichungen (14), (15) und (16).

Ebenso ließ sich der Boden dieses Saales aufnehmen. Für diese Aufnahmen wurden keine besonderen Gerüste oder Aufbauten genutzt. Dennoch war es möglich, mit einem Scan Ebenen von ca. 16 m × 20 m digital abzubilden. Eine zusätzliche Beleuchtung wurde nicht eingesetzt. Insgesamt wurde mit drei 360° Scans der Raum in vollen $4 \cdot \pi$ digital abgebildet.

Die Transformationsgleichungen lassen sich auch aus dem Modell „Virtuelle Matrixkamera“, wie in (REULKE & SCHEELE 1997) gezeigt, ableiten. Die Ausgangsbeziehung hierfür ist:

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + t \cdot \mathbf{A}(\phi_2) \mathbf{A}(j\Delta\theta) \mathbf{A}(\phi_1) \cdot \mathbf{r}_d = \mathbf{r}_m \quad (17)$$

mit $\mathbf{r}_m = (j' \cdot \delta, i' \cdot \delta, f)$ als Bildpunktvektor in der virtuellen Matrixkamera.

2 Resamplingverfahren

Bildtransformationen, auch wie sie im vorangegangenen Kapitel behandelt wurden, erzeugen aus ganzzahligen Bildkoordinaten reelle Zahlen, die in irgendeiner Weise wieder in Integerwerte (Bildkoordinaten des transformierten Bildes i' und j') gewandelt werden müssen.

Bei der Nearest-Neighbour-Methode wird jedes Pixel im Ausgangsbild nach der

Transformation dem am nächsten liegenden Element der transformierten Bildebene zugeordnet. Hierbei geht die genau berechnete Position der Pixel (reelle Zahlen) verloren, der Originalgrauwert wird beibehalten. In ungünstigen Fällen treten durch Rundungsprozeduren Effekte auf, die den visuellen Eindruck stören und die Bildqualität erheblich beeinträchtigen können. Beispielsweise können Gebäudekanten nicht mehr als Gerade, sondern als Zick-Zack-Linie erscheinen. Anschließend werden die Pixel in der transformierten Bildebene, die keinen Wert aus dem Originalbild zugewiesen bekamen, mittels Interpolationsverfahren aufgefüllt.

2.1 Kantenerhaltende Interpolation

Aus der Bildverarbeitung, z. B. auch aus der digitalen Orthophotoerstellung, sind Interpolationsverfahren bekannt, die die Nachteile der Nearest-Neighbour-Methode vermeidet.

Die genau berechneten Positionen der Punkte in der Referenzebene mit ihren dazugehörigen Grauwerten werden als Grundlage für die Berechnung eines Grauwertes für einen Rasterpunkt in derselben Ebene genutzt.

Die Grundidee besteht darin, eine Fläche über eine bestimmte Anzahl von Punkten aufzuspannen. Rasterelemente, deren Mittelpunkt unterhalb dieser Fläche liegen, erhalten einen Grauwert zugewiesen, der aus den Originalgrauwerten der aufgespannten Fläche berechnet wird (Abb. 10).

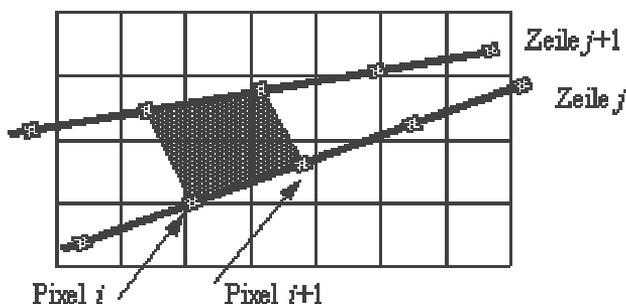


Abb. 10: Von vier Pixeln begrenzte Fläche in der Referenzebene.

Die Implementierung erfolgte so, dass diese Fläche durch jeweils zwei Nachbarpixel zweier aufeinanderfolgender Zeilen begrenzt wird. Damit ergeben sich die vier Eckpunkte mit den Koordinaten (i, j) , $(i, j + 1)$, $(i + 1, j)$ und $(i + 1, j + 1)$. Der Grauwertverlauf über diesem Viereck kann als Funktion mit vier Parametern beschrieben werden, zum Beispiel durch

$$g(i, j) = a_0 \cdot i + a_1 \cdot j + a_2 \cdot i \cdot j + a_3 \quad (18)$$

mit

- g – Grauwert
- i, j – Spalten- und Zeilennummer
- $a_{0...3}$ – Parameter der Grauwertfunktion

Die Parameter der Grauwertfunktion können aus den vier Originalgrauwerten und den dazugehörigen Koordinaten in der Referenzebene berechnet werden. Alle Rasterelemente, deren Mittelpunkte unterhalb dieser Fläche liegen, erhalten einen Grauwert nach Gleichung (18) zugewiesen. Mit diesem Verfahren können auch größere Zwischenräume überbrückt werden. Fehlstellen

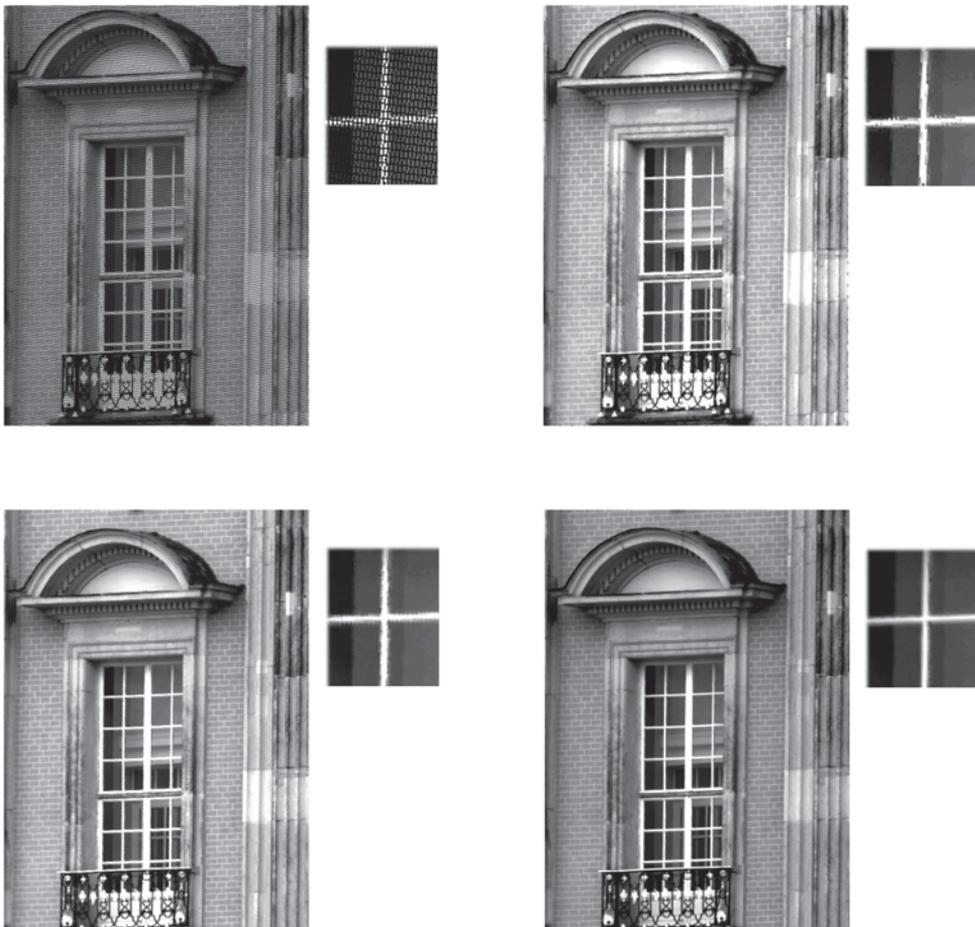


Abb. 11: Ausschnitt aus Abb. 4, links oben ohne Glättung, rechts oben Nearest-Neighbour-Methode, links unten bilinearere Interpolation, rechts unten Interpolationsalgorithmus, das jeweilige Detail wurde um den Faktor drei vergrößert.

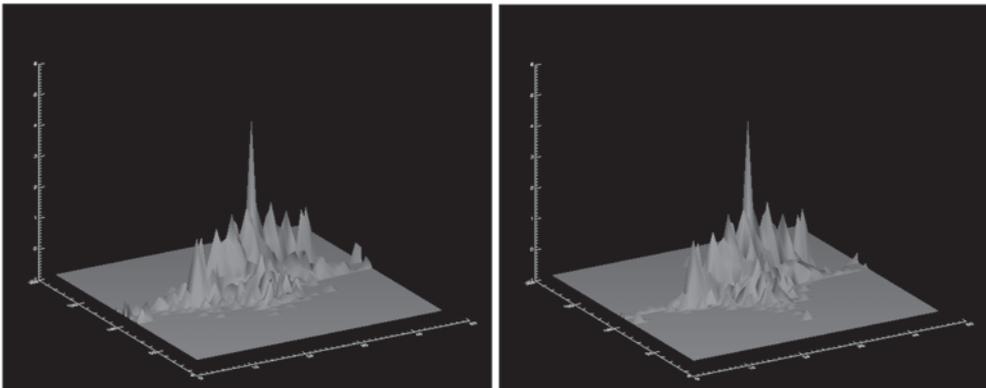


Abb. 12: Untersuchung der mit der Nearest-Neighbour- und mit der Interpolationsmethode korrigierten Bildausschnitte im Fourier-Raum.

existieren nicht, somit kann auf einen zusätzlichen Interpolationsalgorithmus verzichtet werden. Die durch die Rundungsalgorithmen bei der Nearest-Neighbour-Methode verursachten Probleme während des Resamplings werden vermieden. Illustriert wird dieses Verfahren in den folgenden Bildern. In Abb. 11 in ein Detail von Abb. 5 (Neues Palais) als Ergebnis der Nearest-Neighbour-Methode, der bilinearen Interpolation, wie sie in Standardsoftware (z. B. ENVI) benutzt wird, und der oben behandelten Interpolationsmethode zu sehen.

Die Güte der Bildkorrektur kann mit verschiedenen Kriterien und Verfahren beschrieben werden. Es wurden zwei Verfahren benutzt, um die Qualität der verschiedenen Resamplingmethoden zu bewerten: die Fouriertransformierten der transformierten Bilder und die Möglichkeit, Bildzuordnungsverfahren (Matching) in diesen Bildern anzuwenden.

Die Fouriertransformierte der transformierten Daten gibt Auskunft über die Raumfrequenzen im Bildraum. Der bei der Anwendung der Nearest-Neighbour-Methode auftretende Effekt der Zick-Zack-Linien verursacht einen größeren Anteil hoher Raumfrequenzen. In Abb. 12, in der die Fouriertransformierten der Bilder von Abb. 5 dargestellt sind, ist das zu erkennen. Die kantenerhaltende Interpolationsmethode unterdrückt diesen Effekt (Pfeile).

Ein weiterer Maßstab für die Qualität der Resamplingalgorithmen ist die Fähigkeit, homologe Punkte in jeweils zwei mit den Resamplingmethoden korrigierten Bildern zu finden. Dazu wurden zwei Bildausschnitte (30°) von den Originalbildern (Abb. 7) des Neuen Museums verwendet, die von zwei 1 m voneinander getrennten Orten aufgenommen wurden. Mit Hilfe eines flächenbezogenen Least-Square-Matching-Algorithmus (HEIPKE 1994) wurden in den Bildpaaren identische Punkte gesucht. Das Ergebnis dieser Untersuchung zeigte, dass durch die Interpolationsmethode im Vergleich zu der Nearest-Neighbour-Methode 20% mehr homologe Punkte gefunden werden konnten. Es lässt sich somit feststellen, dass die Interpolationsmethode für die Visualisierung und Weiterverarbeitung der Bilddaten besser geeignet ist als die Nearest-Neighbour-Methode. Gegen sie spricht ein deutlich höherer Zeitaufwand, ca. Faktor 6. Des Weiteren scheint ein Subpixel-Matching in einem mit der Nearest-Neighbour-Methode korrigierten Bild fraglich. Dagegen könnte die Interpolationsmethode Bildzuordnungsergebnisse im Subpixelbereich gestatten.

Außer den hier diskutierten Interpolationsalgorithmen wurden verschiedene andere Methoden getestet. Verfahren, die auf adaptiven Rundungsvorschriften beruhen, führten dabei zu keiner merklichen Bildverbesserung. Eine Methode, die auf der Ver-

feinerung des Rasters in der transformierten Bildebene durch Verdopplung der Pixel- und Zeilenanzahl des Ausgangsbildes sowie Halbierung von δ , lieferte zwar qualitativ ebenso gute Ergebnisse wie das hier beschriebene Interpolationsverfahren, benötigt aber wesentlich mehr Arbeitsspeicher.

Danksagung

Besonderen Dank gilt Herrn MICHAEL NEIDHARDT (DLR Berlin), der die Kamera WAAC zum Einsatz brachte und Herrn MARTIN REGEHLY (stud. ph., Ilmenau) für die Aussenaufnahme vom Neuen Palais, die er mit seiner prämierten Kamera durchführte, Herrn SCHÖNHERR von der Firma KST (Dresden) für die Panoramaaufnahmen. Herrn BENNKE und der Stiftung Preußischer Schlösser und Gärten Berlin-Brandenburg danken wir für die Zusammenarbeit bei den Innenaufnahmen im Neuen Palais.

Literatur

- BÖRNER, A. et al., 1996: Stereo processing with attitude-disturbed image data. – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing; Vol. XXXI, Part B3, Commission III, p. 686.
- HAALA, N. et al., 1997: Geometric Processing of High Resolution Airborne Scanner Imagery Using GPS-INS and Ground Control Points. – Proceedings of the Third International Airborne remote Sensing Conference and Exhibition, Vol. I, p. 371.
- HEIPKE, C., 1994: Digitale photogrammetrische Arbeitsstationen – Algorithmen, Design und Bewertung. – Habilitationsschrift, TU München.
- Jugend forscht, 1998: Ergebnisliste „Jugend forscht“. – Bundeswettbewerb 1998.
- LUHMANN, TH., 2000: Nahbereichsphotogrammetrie. – Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- LISOWSKI, W. & WIEDEMANN, A., 1998: Auswertung von Bilddaten eines Rotationszeilenscanners. – DGPF-Tagungsband 7, 1999, S. 183.
- REULKE, R. & SCHEELE, M., 1997: CCD-Line Digital Imager for Photogrammetry in Architecture. – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXII, Part 5C1B, p. 195.
- SANDAU, R. & ECKARDT, A., 1996: The Stereo Camera Family WAOSS/WAAC for Spaceborne/Airborne Applications. – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXI, Part B1, Commission I, p. 170.
- WEWEL, F. et al., 1999: High Resolution Stereo Camera (HRSC) – Multispectral 3D-Data Acquisition and Photogrammetric Data Processing, Proc. of the Fourth International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, Vol. 1 p. 263.

Anschrift der Verfasser:

Dr. MARTIN SCHEELE
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)
Institut für Weltraumsensorik und Planetenerkundung
Rutherfordstrasse 2, D-12484 Berlin,
Tel.: (+49) 30 67 05 55 21,
Fax: (+49) 30 67 05 55 29
e-mail: martin.scheele@dlr.de

Dr. ANKO BÖRNER
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)
Institut für Weltraumsensorik und Planetenerkundung
Rutherfordstrasse 2, D-12484 Berlin,
Tel.: (+49) 30 67 05 55 09,
Fax: (+49) 30 67 05 55 29
e-mail: anko.boerner@dlr.de

KARSTEN SCHEIBE
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)
Institut für Weltraumsensorik und Planetenerkundung
Rutherfordstrasse 2, D-12484 Berlin,
Tel.: (+49) 30 67 05 55 26,
Fax: (+49) 30 67 05 55 29
e-mail: karsten.scheibe@dlr.de

Dr. RALF REULKE
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)
Institut für Weltraumsensorik
Rutherfordstrasse 2, D-12484 Berlin,
Tel.: (+49) 30 67 05 55 18,
Fax: (+49) 30 67 05 55 29
e-mail: ralf.reulke@dlr.de

Manuskript eingegangen: September 2000
Angenommen: Oktober 2000