

Erzeugung hybrider digitaler Höhenmodelle aktiver Vulkane am Beispiel des Merapi, Indonesien

Vom Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie
der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Gwendolyn Läufer
aus
Offenbach am Main

Referent: Prof. Dr.-Ing. Carl Gerstenecker
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Bernhard Wrobel

Tag der Einreichung: 04.11.2002
Tag der mündlichen Prüfung: 24.04.2003

Darmstadt 2003

D 17

Geodäsie

Band 11

Gwendolyn Läufer

**Erzeugung hybrider digitaler Höhenmodelle aktiver
Vulkane am Beispiel des Merapi, Indonesien**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 2003

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2003

Copyright Shaker Verlag 2003

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-2345-2

ISSN 1438-4566

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Vorwort

Diese Arbeit ist am Institut für Physikalische Geodäsie der TU Darmstadt in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Photogrammetrie und Kartographie entstanden und wurde im Rahmen eines interdisziplinären Gemeinschaftsprojekts zur Disaster-Forschung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft finanziell unterstützt.

Für die Bereitstellung dieses außergewöhnlich interessanten Themas, die Möglichkeit unglaublich viel Neues zu lernen und zu erleben sowie für eine fantastische Zusammenarbeit hier in Darmstadt und während zahlreicher spannender Auslandseinsätze danke ich meinem Referenten Herrn Prof. Carl Gerstenecker ganz besonders herzlich.

Prof. Bernhard Wrobel danke ich herzlichst für die Übernahme des Korreferats und zahlreiche wertvolle Hinweise, für die er mehrmals den Weg nach Darmstadt angetreten hat.

Ausdrücklich sei Herrn Dipl.-Ing. Dieter Steineck für die Ausführung der photogrammetrischen Auswertungen und Herrn Dipl.-Ing. Olaf Hossfeld für seine Unterstützung bei diversen Hard- und Softwareproblemen gedankt.

Ein spezieller Dank geht nach Holland ans Delft Institute of Earth-Oriented Space Research (DEOS) an der TU Delft, wo Dr. Remko Scharroo präzise Ephemeriden und Bert Kampes seine Freeware DORIS zur SAR-Auswertung zur Verfügung stellten. Beides hat zu den Ergebnissen dieser Arbeit wesentlich beigetragen.

Der lieben Ingrid Blessing danke ich ganz herzlich für all ihre Hilfe bei der Bewältigung zahlreicher formaler und organisatorischer Hürden und für die schönen Kaffeepausen.

Mein ganz besonderer Dank gilt schließlich meinen Eltern für Ihre Liebe und Unterstützung auf all meinen Lebenswegen und natürlich für die Vermessergene.

Kurzfassung

Für viele geowissenschaftliche Fragestellungen ist ein präzises hochauflösendes Digitales Höhenmodell notwendig. Speziell bei aktivem Vulkanismus ist die Generierung eines solchen Modells jedoch auf direktem Wege oft nicht möglich. Aufgrund aktiver Rauchbildung und topographischer Besonderheiten (Hangneigungen bis zu 45° im Gipfelbereich, tiefe und enge Schluchten etc.) stoßen die verschiedenen gängigen Fernerkundungsmethoden alle an ihre Grenzen. Die Lösung besteht in der Fusion verschiedener Quelldaten zu einem hybriden Höhenmodell, um die Vorteile der einzelnen Verfahren zu nutzen und ihre Nachteile auszugleichen. Eine Schwierigkeit ist hierbei die Anpassung und richtige Zuordnung der Daten aufeinander, wenn keine Passpunkte vorliegen.

In dieser Arbeit wurde ein Verfahren entwickelt und erprobt, um Digitale Höhenmodelle ohne den Einsatz von Passpunkten optimal aufeinander anzupassen. Die Parameter einer Transformation zwischen den einzelnen Höhenmodellen werden iterativ mit Hilfe einer vermittelnden Ausgleichung aus dem Vergleich der Geländehöhen ermittelt. Hierbei kann je nach Aufgabenstellung zwischen räumlicher Affintransformation und verschiedenen bilinearen Transformationen gewählt werden. Das Verfahren kommt ohne den Einsatz von Passpunkten aus. Minimiert werden die Quadratsummen der Höhendifferenzen zwischen näherungsweise transformiertem Quelldatensatz und Zieldatensatz. Mit Hilfe eines robusten Schätzverfahrens, der Regewichtung, wird der Einfluss von groben Fehlern reduziert.

Für den Hochrisikovulkan Merapi auf Java, Indonesien, gelang es auf diese Weise ein hybrides Modell zu erstellen, welches signifikant besser ist als die einzelnen Modelle der Quelldaten.

Im Falle des Merapi wurden satellitengestützte SAR-Daten mit flugzeuggestützten photogrammetrischen Aufnahmen kombiniert. Ein Vergleich der Abbildungsgeometrien und Fehlerquellen beider Verfahren zeigt, dass sich beide Techniken bei richtiger Kombination optimal ergänzen. So wurde zunächst aus beiden Datenquellen unabhängig voneinander ein Digitales Höhenmodell des Geländes erstellt. Die globalen Fehler eines durch Passpunkte nicht gestützten SAR-Modells können dann mit Hilfe des Photogrammetrischen Modells korrigiert und lokale Problemzonen mit SAR-Daten ergänzt werden.

Im Rahmen der SAR-Prozessierung wurden sechs verschiedene Unwrapping-Algorithmen auf ihre Anwendbarkeit getestet und gegenübergestellt. Ein Ergebnis dieser Untersuchungen ist, dass sich der ‚Flynn’s-Minimum-Discontinuity-Algorithmus‘ für Anwendungen an tropischen Stratovulkanen, die aufgrund ihrer geometrischen Besonderheiten zu starken SAR-typischen Verzerrungen führen, am besten eignet.

Bei dem Vergleich der Modelle stellt sich heraus, dass sich das SAR-Modell in flachen Regionen gut mit einer räumlichen Affintransformation an das genauere

Photogrammetrische Modell anpassen lässt. In den steileren Bergregionen können die Verzerrungen zwischen beiden Modellen jedoch nur mit Hilfe nichtlinearer Abbildungsgleichungen beschrieben werden. Werden die höheren und damit auch steileren Regionen des Merapi mit einbezogen, verschlechtert sich z.B. die Standardabweichung der Restklaffungen signifikant (auf das bis zu 7-fache).

Der sich daraus ergebende Lösungsansatz geht aus diesem Grund einen zweistufigen Weg. Das SAR-Modell wird zunächst mit einer räumlichen Affintransformation näherungsweise auf das genauere Photogrammetrische Modell angepasst. In einem zweiten Schritt werden mit Hilfe des entwickelten flächenhaften Anpassungsverfahrens die Transformationsparameter einer polynomialen Transformation zwischen beiden Modellen bestimmt.

Die erreichten Genauigkeiten wurden mit Hilfe von GPS-Kontrollpunkten, welche auf $\pm 2\text{cm}$ bekannt sind, überprüft. Das photogrammetrische Modell zeigt in den Problemzonen, in denen die Daten interpoliert werden mussten, Abweichungen von bis zu 150m. Nach Ersetzen der Problemzonen mit den transformierten SAR-Daten, verringern sich diese Fehler auf maximal 62m.

Ergebnis ist ein hochauflösendes Digitales Höhenmodell des Merapi, das die Genauigkeiten des Photogrammetrischen Modells mit den Informationen aus SAR im Gipfelbereich des Merapi verbindet.

Abstract

A precise Digital Terrain Model (DTM) is needed as precondition by many geophysical applications. In the case of active volcanism, especially in tropical regions, the generation of such a DTM is a challenging task. All common remote-sensing techniques are facing severe problems here, because of disturbing clouds, active smoke-generation and extreme topography (deep canyons, steep slopes with inclinations up to 45° at the summit). The solution must include a combination of different methods, resulting in a hybrid DTM. One challenge in this process is the adjustment and right allocation of the different data-sets to each other. This step becomes increasingly important if there are no ground control points available.

In this work a technique was developed to obtain an optimal match between different DTMs, without the use of ground control points. The transformation parameters between the data-sets are derived iterative by least square adjustment. According to the requirements one can be choose among different transformation approaches.

Input are the grids of terrain heights of the entire covered area of the models, instead of single points. The method is therefore called an areal adjustment-approach. The square-sums of the height differences between approximately transformed source-data and objective-data are minimized. The influence of blunders is reduced by the use of robust estimators.

With this technique a hybrid DTM for the high risk volcano Merapi in Java, Indonesia, was generated. Satellite borne SAR-data and aerial photogrammetric images were combined. A comparison of image geometries and error sources of both techniques shows, that SAR-Interferometry and airborne Photogrammetry may complement each other advantageously. Through the combination it is possible to exploit the advantages of each method and balance the disadvantages. In the case of Mt. Merapi the global error of the SAR-data can be corrected with the photogrammetric data and the local gaps due to clouds and smoke in the photogrammetric model can be filled by information out of the SAR-model.

While processing the SAR-data six different unwrapping algorithm were tested and compared. This study reveals that the Flynn algorithm leads to the best results in the case of tropical stratovolcanoes.

Comparison of the SAR DTM with the photogrammetric DTM demonstrates that the lower flat regions can be fitted accurately with a 7-parameter affine transformation to each other. However, severe significant distortions occur in the higher mountainous areas, which can only be handled by means of nonlinear transformations.

Therefore the combination of the two data sets is done in two steps. First the SAR-model is transformed with a 7-parameter affine transformation, to get a coarse match

to the photogrammetric model. In the second step the parameters of a polynomial transformation are derived with the developed areal adjustment technique.

With known GPS ground control points the accuracy of the result is checked. The photogrammetric model shows deviations of up to 150m in the zones that were affected by distortion. After replacing these zones with information from the SAR-model, the errors can be reduced to 62m.

The final result is a high-resolution precise digital elevation model, combining the overall accuracy of the photogrammetric model with the information on the summit of the SAR-model.

Abbildungsverzeichnis	3
Abkürzungen und Akronyme	5
Symbole	6
1 Einleitung	9
1.1 Motivation der Arbeit.....	9
1.2 Überblick über die Arbeit.....	10
1.3 Vulkanismus	11
1.4 Digitale Höhenmodelle aktiver Vulkane.....	12
1.5 Deformationen der Erdoberfläche an aktiven Vulkanen	13
1.5.1 Externe Ursachen	13
1.5.2 Interne Ursachen	14
1.6 Datenerfassung an aktiven Vulkanen.....	15
1.6.1 Datenerfassung für Digitale Höhenmodelle.....	15
1.6.2 Datenerfassung zur Bestimmung von Oberflächendeformationen	18
2 Untersuchungsgebiet des Vulkans Merapi	21
2.1 Geologisch-tektonische Situation	22
2.2 Ergebnisse des Projekts MERAPI	25
2.3 Ausbruchsgeschichte und Eruptionstypen des Merapi.....	28
2.4 Digitale Höhenmodelle für den Merapi	30
2.4.1 Vorhandene Digitale Höhenmodelle.....	30
2.4.2 Geforderte Auflösung und Genauigkeit für ein DHM.....	31
3 Verfahren zur DHM-Erzeugung	33
3.1 Einführung	33
3.2 Laser-Scanning.....	35
3.3 Photogrammetrie	35
3.3.1 Abbildungsgeometrie	35
3.3.2 Normalfall der Zweibildauswertung	38
3.4 SAR – Interferometrie.....	40
3.4.1 Physikalische Grundlagen	41
3.4.2 Satellitengestützte SAR-Missionen	44
3.4.3 Prinzip des Radars mit synthetischer Apertur	47

3.4.4	Theorie der Interferometrie	50
3.4.5	Geocoding	54
3.4.6	SAR-typische Verzerrungen	55
3.5	Unterschiede Photogrammetrie – Interferometrisches SAR	57
3.6	Kombination mehrerer Höhenmodelle	59
3.6.1	Transformationen mit Passpunkten	60
3.6.2	Flächenhafte Anpassung	62
4	Auswertung und Ergebnisse	69
4.1	Photogrammetrische Auswertung	69
4.1.1	Photogrammetrische Daten	69
4.1.2	Verwendete Photogrammetrie-Software	71
4.1.3	Auswertung der Luftbilder von 1993/94	72
4.1.4	Auswertung der Luftbilder von 1981/82	72
4.1.5	Das DHM der Photogrammetrischen Auswertung	76
4.2	SAR-Auswertung	80
4.2.1	Verwendete SAR-Software	80
4.2.2	Verwendete SAR-Daten	81
4.2.3	Prozessierung der SAR-Szenen	83
4.2.4	Das DHM der SAR-Auswertung	109
4.3	Vergleich und Kombination beider Modelle	109
4.3.1	Anpassung über Passpunkte	111
4.3.2	Flächenhafte Anpassung mit Affintransformation	121
4.3.3	Flächenhafte Anpassung mit polynomialer Transformation	124
4.3.4	Validierung mit Hilfe der GPS-Passpunkte	132
5	Fazit und Ausblick	134
	Literaturverzeichnis	141