

DISS. ETH NO. 16078

Automatic Digital Surface Model (DSM) Generation from Linear Array Images

A dissertation submitted to the
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

for the degree of
Doctor of Technical Sciences

Presented by

Li Zhang

M.Sc, Wuhan University

born 5th of October, 1970
citizen of Chinese

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Armin Grün, examiner
Prof. Zuxun Zhang, co-examiner

2005

Abstract

This dissertation addresses the topic of automatic Digital Surface Model (DSM) generation from linear array images. Research on this issue is mainly motivated by the following facts: In recent years, CCD linear array sensors are widely used to acquire high-quality, high-resolution panchromatic and multispectral imagery for photogrammetric and remote sensing applications. Most of these sensors have the ability to acquire more than 2 views of the terrain surface during a single flight line or orbit. The processing of these kinds of images provides a challenge for algorithmic redesign and this opens the possibility to reconsider and improve many photogrammetric processing components. In particular, automatic DSM generation through image matching techniques is one of the main topics. Although this topic has gained much attention in the past years and a wide variety of approaches have been developed, the accuracy performance and the problems encountered are very similar in the major approaches and the performance of these approaches does by far not live up to the standards set by manual measurements. Therefore, efforts have to be made to develop a general framework for automatic DSM generation from linear array images, into which specific algorithms can be inserted easily, investigated and combined in order to achieve reasonable results in terms of precision and reliability.

In this dissertation, an image matching approach for automatic DSM generation from linear array images, which has the ability to provide dense, precise and reliable results is presented. The approach integrates different matching primitives, uses available and explicit knowledge concerning the image geometry and radiometry information, combines several image matching algorithms and automatic quality control, and works with a coarse-to-fine hierarchical matching strategy. The most outstanding characteristics are the efficient utilisation of multiple images and the integration of multiple matching primitives. With this approach, the linear array images and the given or previously triangulated orientation elements are taken as inputs. After pre-processing of the original images and production of the image pyramids, the matches of 3 kinds of features, i.e. feature points, grid points and edges, on the original resolution images are finally found progressively starting from the low-density features on the images with the lowest resolution. An intermediate DSM is reconstructed from the matched features on each level of the pyramid by using the constrained Delauney triangulation method, which in turn is used in the subsequent pyramid level for the approximations and self-tuning of the matching parameters. Finally least squares matching methods are used to achieve more precise matches for all the matched features and identify some false matches.

The presented approach essentially consists of several mutually connected components: the image pre-processing, the multiple primitive multi-image (MPM) matching, the refined matching and the system performance evaluation. Each of them is important and possesses particular features, which are fully elaborated in different parts of the dissertation.

First of all, a pre-processing method, which combines an adaptive smoothing filter and the Wallis filter, is used in order to reduce the effects of the inherent radiometric problems and optimize the images for subsequent feature extraction and image matching procedure. The method mainly consists of 3 processing stages. In the first stage, the noise characteristics of the images are analyzed quantitatively in both homogeneous and non-homogeneous image regions. The image blur problem (image unsharpness) is also addressed through the analysis of the image's Modulation Transfer Function (MTF). Then, an adaptive smoothing filter is applied to reduce the noise level and at the same time, to sharpen edges and preserve even fine detail such as corners and line end-points. Finally, the Wallis filter is applied to strongly enhance and sharpen the already existing texture patterns.

The MPM matching procedure is the core of our approach. In this approach, the matching is performed with the aid of multiple images, incorporating multiple matching primitives – feature points, grid points and edges, integrating local and global image information and, utilizing a coarse-to-fine hierarchical matching strategy.

The MPM approach mainly consists of 3 integrated subsystems: point extraction and matching procedure, edge extraction and matching procedure and relational matching procedure. These 3 subsystems are followed through the image pyramid and the results at higher levels are used for guidance at the lower levels. At each pyramid level, the correspondence is established in two matching stages – locally and globally. In the local matching stage dense patterns of points and edges are matched. A unique and robust matching algorithm - The Geometrically Constrained Cross-Correlation (GC³) algorithm is employed to provide matching candidates for points and edge pixels. The algorithm is based on the concept of multi-image matching guided from the object space and allows reconstruction of 3D objects by matching all the images at the same time, without having to go through the processing of all individual stereo-pairs and the merging of all stereo-pair results. The GC³ method, with the self-tuning of the parameters, leads to a reduction of problems caused by occlusions, multiple solutions and surface discontinuities. The global matching stage is responsible for imposing global consistency among the candidate matches in order to disambiguate the multiple candidates and avoid mismatches. The global matching is resolved by a probability relaxation based relational matching method. It uses the local support provided by points within a 2D neighborhood. This corresponds to imposing a piecewise smoothness constraint, in which the matched edges serve as breaklines in order to prohibit the smoothness constraint crossing these edges and preserves the surface discontinuities.

The modified Multiphoto Geometrically Constrained Matching (MPGC) and the Least Squares B-Spline Snakes (LSB-Snakes) methods are used to achieve potentially sub-pixel accuracy matches and identify some inaccurate and possibly false matches. The DSM derived from the MPM module provides good enough approximations for these methods and increases the convergence rate. The initial values of the shaping parameters in MPGC matching can also be predetermined by using the image geometry and the derived DSM data. Finally, for each matched point, a reliability indicator is assigned based on the analysis of the matching results. For edges, a simplified version of the LSB-Snakes is implemented to match the edges, which are represented by parametric linear B-spline functions in object space. With this method, the parameters of linear B-spline functions of the edges in object space are directly estimated, together with the matching parameters in the image spaces of multiple images.

The system has been tested extensively of linear array images with different image resolution and over different landcover types. The accuracy evaluation is based on the comparison between high quality DEMs/DSMs derived from airborne Laser Scanner or manual measurements and the automatically extracted DSMs. As evidenced by the visual inspection of the results, we can reproduce not only the general geomorphological features of the terrain relief, but also detailed features of relief. The results from the quantitative accuracy test indicate that the presented concept has the capability to give good and encouraging results. If the bias introduced by trees and buildings is taken out, we can expect a height accuracy of one pixel or even better from satellite imagery as “best case” scenario. In case of very high-resolution TLS/SI images (footprint 8 cm and better) it is obvious that the “one pixel rule” cannot be maintained any more. Alone surface roughness and modeling errors will lead to larger deviations, such that an accuracy of 2 to 5 pixels should be considered an acceptable result.

Zusammenfassung

Die vorliegende Promotionsarbeit beschäftigt sich mit dem Thema automatische Generierung von digitalen Oberflächenmodellen aus Bildern, welche mit Linearzeilensensoren erfasst wurden. Die Untersuchungen dieser Arbeit sind hauptsächlich motiviert durch folgende Gründe: In den letzten Jahren wurden CCD-Zeilensensoren weitestgehend genutzt um panchromatische und multispektrale Bilder mit hoher Auflösung und Qualität für Anwendungen in der Photogrammetrie und Fernerkundung zu generieren. Die meisten Zeilensensoren haben die Fähigkeit, während des Fluges von mindestens zwei Blickwinkeln von einem Gebiet Bilder zu erfassen. Das Prozessieren von diesen Bildern stellt eine Herausforderung an die Neugestaltung der Algorithmen dar und öffnet uns die Möglichkeit, einige photogrammetrische Arbeitsschritte nachzuprüfen und zu verbessern.

Die automatische Oberflächengenerierung mit den Matching-Methoden ist ein Schwerpunkt der Dissertation. Abgesehen davon, dass zu diesem Thema in den letzten Jahren eine Vielfalt von Methoden entwickelt wurden, stiessen die entwickelten Module auf sehr ähnliche Genauigkeitsgrenzen und Probleme in der Realisierung. Die automatischen Methoden erfüllen bei weitem nicht die Standards, welche bei manuellen Messungen erreicht werden können. Daher muss für die Entwicklung eines allgemeinen Systems für die automatische Generierung von DSM-Daten grosse Sorgfalt getroffen werden. In das gesamte System sollen einige spezielle Algorithmen integriert und miteinander verknüpft werden, um im Hinblick auf Genauigkeit und auf Zuverlässigkeit angemessene Ergebnisse zu erhalten.

In der vorliegenden Promotionsarbeit wird eine Image-Matching Methode für die automatische Generierung von Oberflächenmodellen vorgestellt. Diese Methode bietet die Möglichkeit, genaue und zuverlässige Daten mit hoher Punktdichte zu erzeugen. Es werden verschiedene Matching-Grundfunktionen genutzt, sowie vorhandenes und eindeutiges Wissen betreffend der Bildgeometrie und radiometrische Informationen, die Kombination von verschiedenen Bild-Matching Algorithmen, eine automatische Qualitätskontrolle und eine hierarchische, vom groben zum feinen arbeitende Matching-Strategie integriert. Die Integration von verschiedenen Matching-Primitiven und die effiziente Arbeitsweise mit mehreren Bildern ist eine besonders hervorzuhebende Charaktereigenschaft dieser Methode. Bei dem Algorithmus werden als Input die Bilder aus Zeilenkameras und die gegebenen oder triangulierten Orientierungselemente verwendet. Nachdem die Originalbilder vorprozessiert und die Bildpyramiden generiert wurden, werden 3 Typen von Objekten extrahiert. Es werden fortschreitend von einer geringen bis zur Original-auflösung die Merkmals- und Rasterpunkte sowie die Kanten im Bild bestimmt. Für jede Stufe der Bildpyramiden wird ein Zwischenergebnis des Höhenmodells mit der strengen Delauney-Methode aus den vorher bestimmten Objekten erzeugt. Dieses Zwischenergebnis wird wiederum als Näherung für die nachfolgenden Pyramidenlevel sowie für die automatische Bestimmung der Matching-Parameter genutzt. Letztendlich wird eine Least Square Matching Methode angewendet, um die Genauigkeit der bestimmten Objekte zu erhöhen und grobe Fehler zu identifizieren.

Die vorliegende Methode besteht aus den folgenden verschiedenen Schritten, welche gegenseitig miteinander verknüpft sind: Das Vorprozessieren der Bilder, die „multiple primitive multi-image“ (MPM) Matching-Methode, das verfeinerte Matching und die Beurteilung der Systemleistung. Jeder Arbeitsschritt ist wichtig und besitzt spezielle Funktionen. Die einzelnen Funktionen werden detailliert in der Dissertation ausgearbeitet.

Als erstes wird das Vorprozessieren der Bilder beschrieben. Diese Methode verknüpft einen adaptiven Glättungsfilter und den Wallisfilter miteinander, wobei die Bildradiometrie verbessert werden soll. Zusätzlich bewirken diese Filter eine Optimierung der Bilder für die anschliessende Objektextraktion sowie für das Bild-Matching. Dieser Teilschritt besteht

hauptsächlich aus drei Stufen. In der ersten Stufe werden die Rauscheigenschaften des Bildes quantitativ in den homogenen und inhomogenen Bildregionen analysiert. Die Unschärfe im Bild wird durch die Analyse der MTF (Modulation Transfer Function) bestimmt. Weiter wird ein adaptiver Smoothing Filter angewendet um das Rauschen im Bild zu reduzieren und zusätzlich die Kanten hervorzuheben sowie um feine Strukturen (Ecken und Endpunkte von Linien) zu erhalten. Schlussendlich wird ein Wallis Filter angewendet, um die vorhandenen Muster zu verstärken und zu schärfen.

Die MPM Matching Methode ist das Herzstück unseres Ansatzes. In dieser Anwendung wird mit der Hilfe von mehreren Bildern ein Matching durchgeführt. Diese Methode verknüpft verschiedene Matching Primitive wie Objektpunkte, Rasterpunkte und Kanten miteinander, verwendet lokale und globale Bildinformationen und nutzt eine hierarchische Vorgehensweise (vom Groben zum Feinen).

Die MPM Methode ist in folgende drei Hauptarbeitsschritte zerlegbar: Punkterkennung und anschließendes Matching, Kantenextraktion und Matching sowie ein relationaler Matching-Algorithmus. Diese Arbeitsschritte werden in allen Pyramidenstufen durchgeführt und die Ergebnisse in den höheren Levels werden als Näherungen in den unteren Levels genutzt. In der lokalen Matchingstufe wird ein dichtes Raster von Punkten und Kanten extrahiert. Nach diesem Schritt folgt ein eindeutiger und robuster Matching-Algorithmus (Geometrically Constrained Cross-Correlation (GC^3)) um Matching-Kandidaten für Punkte und Kantenpixel zu erstellen. Dieser Algorithmus wird basierend auf dem Konzept des Multi-Image-Algorithmus im Objektraum durchgeführt und erlaubt die Rekonstruktion von 3D-Objekten durch Matching in allen Bildern zur selben Zeit. Höhenmodelle müssen daher nicht aus den einzelnen Stereopaaren abgeleitet und anschließend miteinander verknüpft werden. Die GC^3 Methode, mit ebenfalls automatisch anpassbaren Parametern, führt zur Reduktion der Probleme, welche beim Prozessieren durch Verdeckungen, Mehrfachlösungen und Geländeunstetigkeiten entstehen. Die globale Matching-Stufe ist dafür verantwortlich dass im Gesamten eine eindrucksvolle Konsistenz unter den Kandidaten aus dem Matching im Hinblick die Identifizierung der Mehrfachkandidaten und um grobe Fehler zu vermeiden, entsteht. Das globale Matching basiert auf einer relationalen Matching Methode, die den „Probability Relaxation“ Algorithmus nutzt. Diese Methode verwendet die lokalen Nachbarpunkten im 2D-Raum für die Berechnung und führt zu einer eindrucksvollen stückweisen Glättungsbedingung, in der die extrahierten Kanten als Bruchkanten genutzt werden. Die Kanten sowie die Oberflächenunstetigkeiten gehen nicht verloren.

Die modifizierte MPGC (Multi Photo Geometric Constrained) und die LSB-Snakes Methode wird genutzt um Subpixel-Genauigkeit zu erhalten und identifiziert ungenaue Messungen und mögliche Fehlmessungen. Das mit dem MPM-Modul abgeleitete Oberflächenmodell liefert eine genaue Näherung für diese Methoden und erhöht damit die Konvergenzrate. Die Startwerte für die Parameter der MPGC-Matching Methode können vorbestimmt werden, indem die Bildgeometrie und das abgeleitete Oberflächenmodell benutzt wird. Schlussendlich, basierend auf der Analyse der Matchingergebnisse, kann für jeden bestimmten Punkt ein Wert für die Zuverlässigkeit ausgegeben werden. Für die Definition der Kanten wurde eine einfache Form der Least Squares B-Spline Snakes (LSB-Snakes) Methode implementiert, indem diese als parametrische lineare B-Spline Funktion im Objektraum dargestellt werden. Dadurch werden die Parameter der linearen B-Spline Funktion der Kanten im Objektraum im Zusammenhang mit den Matching Parametern im Bildraum für mehrere Bilder direkt bestimmt.

Das entwickelte System wurde weitestgehend mit Bildern aus Linearzeilensensoren, verschiedenen Bildauflösungen und über verschiedenen Landschaftstypen getestet. Die Evaluation der Genauigkeit wurde mittels qualitativ hochwertiger Höhenmodelle und

Oberflächenmodelle, abgeleitet aus Laserdaten, oder manuellen Messungen und anderen automatisch abgeleiteten Höhenmodellen analysiert. Durch eine visuelle Beurteilung der Ergebnisse konnte nachgewiesen werden, dass die entwickelte Methode nicht nur generelle geomorphologische Merkmale der Oberflächen sondern auch detaillierte Merkmale bestimmen kann. Die Ergebnisse eines quantitativen Genauigkeitstests zeigten, dass die Methode hat gute und vielversprechende Ergebnisse generiert. Wenn die systematischen Fehler, verursacht durch Bäume und Gebäude, nicht mit berücksichtigt werden, können wir Genauigkeiten in der Höhe bei Satellitenbildern von einem Pixel oder besser im „best case“ Szenario erwarten. Unter Verwendung der hochauflösenden TLS/SI Bilder (Bodenauflösung von 8 cm und besser) kann das eine Genauigkeit von einem Pixel nicht mehr erzielt werden. Allein die Beschaffenheit der Oberfläche und Modellierungsfehler führen zu grösseren Fehlern. Daher können hier Ergebnisse mit Genauigkeiten von 2-5 Pixel als gute Ergebnisse bezeichnet werden.