

Ableitung topographischer Strukturlinien aus Laserscannerdaten mit Methoden der Bildverarbeitung

LICHUN SUI, München

Zusammenfassung: Die mit Flugzeuglaserscannern gewonnenen Daten stellen zunächst unstrukturierte und unregelmäßig verteilte Punkthaufen dar, die einer intensiven Nachbearbeitung bedürfen. Als erste Aufgabe ergibt sich die Separation der gewünschten Laserpunkte auf der Geländeoberfläche (Bodenpunkte) von den nicht verwertbaren Punkten (Nichtbodenpunkte). Eine weitere Aufgabe ist die Extraktion von Strukturlinien aus Laserscannerdaten bzw. aus allgemeinen DHM-Daten. Das hier entwickelte Verfahren zur Extraktion von Strukturlinien basiert auf den Methoden der digitalen Bildverarbeitung und auf der Krümmungstheorie. Es erlaubt auf einfache Weise Erweiterungen für andere Anwendungsgebiete. Dies wird anhand von Beispielen und Abbildungen dargestellt. Die Genauigkeit der Extraktion von Strukturlinien wird durch die Bestimmung der Subpixelposition gesteigert. Insgesamt zeigt die Arbeit zur Extraktion von Strukturlinien, dass durch die Einführung von digitalen Bildverarbeitungsmethoden in vielen Anwendungsgebieten gute Ergebnisse erzielt werden können, ohne objektspezifisches Wissen einsetzen zu müssen.

Summary: *Terrain Modelling from Laser Scanner Data by Digital Image Processing Approaches.* Airborne laser scanner raw data are unstructured and irregularly distributed points which need intensive post processing. The first step is the separation of valuable points which lie on the ground surface (ground points) from outlayers which are located above it (non-ground points). Another task is the extraction of structure lines from laser scanner or other DEM data. The method presented here was developed for the extraction of structure lines by means of digital image processing methods and on the differential geometry of curves. These operators were initially developed for image processing and are now used in a new context. The developed and implemented methodology is open for further extension and compatibility. It is hence possible to use it in other fields of application. The accuracy of the extraction of structure lines increases due to the determination of sub-pixel positions. The presented work shows that image processing methods yield good results for the extraction of structure lines without the need of specific knowledge of objects.

1 Einführung

Die mit Flugzeug-Laserscannern gewonnenen digitalen Daten stellen zunächst unstrukturierte und unregelmäßig verteilte Punkthaufen dar, die einer intensiven Nachbearbeitung bedürfen. Zu diesem Zweck können die Originaldaten in *Höhenwerte* eines geordneten Digitalen Höhenmodells (DHM) durch Interpolation eines Rasters umgerechnet und als *Grauwerte* einer Bildmatrix interpretiert werden (SUI 1999 und 2002a). Es ergibt sich als erste Aufgabe für die Auswertung von Laserscannerdaten die Separation der gewünschten Laserpunkte auf der Geländeoberfläche (*Bodenpunkte*) von den nicht relevanten Punkten (*Nichtbo-*

denpunkte). Diese Trennung der beiden Punktarten entspricht im Wesentlichen einem Filterungsprozess. Diese Aufgabe kann entsprechend der digitalen Konzeption der Lasermessung durch ein automatisch ablaufendes, digitales Bildverarbeitungsverfahren gelöst werden. Für die Gewinnung von Digitalen Geländemodellen sind die nicht auf der Geländeoberfläche liegenden Punkte (Dächer, Bäume, Fahrzeuge usw.) zu erkennen und zu eliminieren. Zum *Erkennen* und zum *Trennen* von gemessenen Laserpunkten, für die *Gewinnung* und den *Aufbau* von Digitalen Höhenmodellen und zum *Auffinden* von Strukturlinien können die für die Analyse von Bilddaten bekannten Algorithmen der Digitalen Bildverarbeitung heran-

gezogen werden. Im Rahmen einer Studie sind die Möglichkeiten der Digitalen Bildverarbeitung zur Lösung dieses Problems untersucht worden. Die Methode und Ergebnisse zum Trennen von Bodenpunkten und Nichtbodenpunkten können beispielsweise bei LINDENBERGER (1993), KILIAN et al. (1996), FRITSCH et al. (1994) sowie SUI (1999 und 2002a) gefunden werden. Insbesondere bei SUI (2002a) werden unterschiedliche Modelle zur Bearbeitung von Laser-scannerdaten und zahlreiche Abbildungen über die Ergebnisse dargestellt.

Die Extraktion von Strukturlinien aus DHM-Daten ist eine der zwei wichtigsten Aufgaben der Arbeit. Strukturlinien gehören zu den zusätzlichen Forminformationen, die beim Aufbau des präzisen DGMs von großer Bedeutung sind. Unter Strukturlinien können unterschiedliche Modifizierungen verstanden werden, beispielsweise Falllinien bzw. Tallinien und Bruchkanten. Über die Extraktion von Falllinien bzw. Tallinien gibt es eine Vielzahl von Veröffentlichungen (z. B. KRAUS 1984, RIEGER 1992, AUMANN 1994). Dabei können solche Forminformationen beispielsweise durch die Analyse von Tangentialebenen, die Krümmungsberechnung oder Summationsverfahren extrahiert werden.

Die Kantendetektion mit Luftbildern kann man in Standardverfahren und statistische Verfahren einteilen (FUCHS 1998). Bei Standardverfahren zur Kantendetektion, z. B. LoG-, DoG-, Sobel-Operator oder Canny-Verfahren usw., werden die Kantestärke, Kantenrichtung und die erste bzw. zweite Ableitung bestimmt und berechnet. Bei statistischen Verfahren wird dagegen die Wahrscheinlichkeits- oder Energieoptimierung betrachtet. Solche Verfahren sind meistens die globalen Detektionsverfahren.

Die anderen Verfahren zur Kantendetektion basieren auf den Grundlagen der Differentialgeometrie. Die Differentialgeometrie befasst sich mit lokalen Eigenschaften von Kurven und Flächen, die mit der Flächenkrümmung im Krümmungsraum beschrieben werden können (JIANG et al. 1997, WEIDNER 1995). Strukturlinien kennzeichnen eine größere Flächenkrümmung auf der

Geländeoberfläche (WILD 1983, BILL 1999). Deshalb können Strukturlinien möglicherweise durch die Analyse der Flächenkrümmung detektiert werden.

2 Aufgabenstellung

Es ist wichtig, ein allgemeines Verfahren zur Analyse von DGM-Daten und zur automatischen Extraktion von Strukturlinien aus den allgemeinen DGM-Daten zu entwickeln. Aus diesem Grund kann das Verfahren der automatischen Extraktion von Strukturlinien aus DGM-Daten in die folgenden Teilaufgaben eingeteilt werden.

Die erste Aufgabe zur Extraktion von Strukturlinien ist die Vorverarbeitung der Daten. Die Vorverarbeitung bedeutet hier eine Umrechnung der Originaldaten in Höhenwerte eines geordneten digitalen Geländemodells (DGM) und in eine Grauwertbildmatrix, sowie anschließend eine Filterung. Des Weiteren sollen die kleinen in Originaldaten enthaltenen Störungen möglichst noch vor der Kantenextraktion beseitigt werden, damit keine unwichtigen Informationen als Strukturlinien extrahiert werden. Wichtig ist, darauf zu achten, dass ein kantenerhaltendes Filterungsverfahren angewendet wird, damit die in den Daten enthaltenen Kanten- und Strukturinformationen möglichst bei der Vorverarbeitung erhalten bleiben bzw. der Filterungsprozess die Daten nicht negativ beeinflusst. Die Datenfilterung ist allerdings nach Notwendigkeit durchzuführen. Wenn die Originaldaten keine Störungen enthalten, wird diese Filterung auch nicht angewendet.

Das Endergebnis der Extraktion von Strukturlinien kann mittels der tachymetrischen Vermessung oder durch unterschiedliche Visualisierungsmethoden überprüft werden. Unter den vorliegenden Bedingungen wird hier nur eine visuelle Überprüfung durchgeführt.

3 Vorverarbeitung von DHM-Daten

3.1 Umrechnung der DHM-Daten in Grauwertbild

Wenn rasterförmige DHM-Daten als Höhenwerte angewendet werden, können sie einfach in die Form von Grauwerten umgerechnet werden. Dabei kann man eine einfache Umrechnungsformel verwenden:

$$G_i = \frac{255}{H_{\max} - H_{\min}} \cdot (H_i - H_{\min}) \quad (1)$$

wobei H_{\max} und H_{\min} den höchsten und tiefsten Höhenwert innerhalb der DHM-Daten darstellen.

Die Abb. 1 (a) stellt die Verteilung der Original-Laserpunkte dar. Die Abb. 1 (b) zeigt das gleiche Gebiet, nachdem die Höhen interpoliert in Grauwerten kodiert wurden. Auf diesem Bild kann man erkennen, welche Geländeformen dargestellt werden.

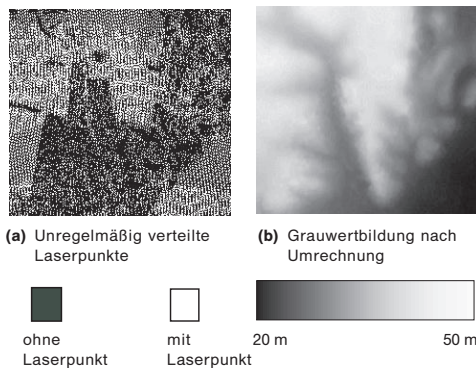


Abb. 1: Umrechnung von Laserpunkten in ein Grauwertbild.

3.2 Datenverbesserung

Die Glättung und Kantenverstärkung von Daten bilden zusammen die Bildverbesserung. Diese Bildverbesserung hat das Ziel, die selektive Information durch die Hervorhebung geometrischer Strukturen in Daten zu verstärken. Dabei kann eine kantenerhaltende Filterung eingeführt und angewendet werden.

Den Effekt der kantenerhaltenden Filterung kann man durch die folgenden Darstellungen zeigen. Die Abb. 2 (b), (c) und (d) zeigen drei extrahierte Kantenlinienbilder. Die extrahierten Kantenlinien mit Originaldaten sind nicht sehr zufrieden stellend (Abb. 2 (b)). Die Abb. 2 (c) zeigt ein Ergebnis mit der bewegten Mittelwertfilterung. Die Kantenlinien sind zwar gut detektiert, die Daten sind aber stark geglättet und die Diskontinuitätsgrenzen sind verschmiert. Die Abb. 2 (d) stellt ein Ergebnis mit dem adaptiven Gradienten dar. Dieses Ergebnis ist besser als das der Abb. 2 (b) und (c).

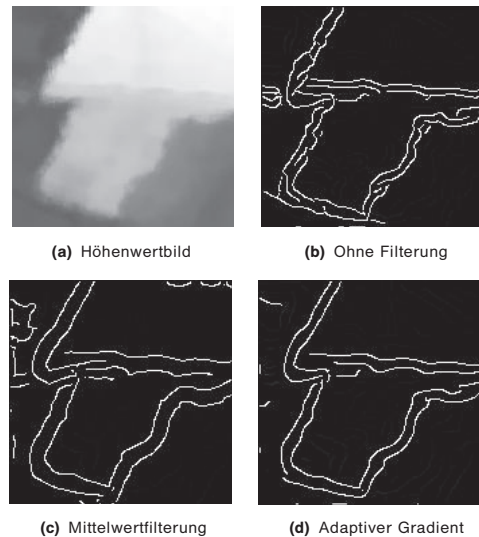


Abb. 2: Effekt der Datenfilterung.

4 Extraktion von Bruchkantenlinien

4.1 Vorbemerkung

Strukturlinien gehören zu den zusätzlichen Forminformationen, die beim Aufbau eines präzisen DGMS von großer Bedeutung sind. Unter Strukturlinien können unterschiedliche Modifizierungen verstanden werden, beispielsweise *markante Punkte*, *Bruchkanten* und *Gerippllinien (Abflusslinien)*. *Markante Punkte* beschreiben die relativ höchsten oder tiefsten Punkte auf Kuppen bzw. in Mulden (BILL 1999, WILL 1983).

Die zweite Gruppe der zusätzlichen Forminformationen beschreibt das Zusammenstoßen zweier verschieden geneigter Teilflächen entlang von Falllinien. Solche Kantenlinien wurden beispielsweise von KRAUS (1984, 1991), RIEGER (1992), AUMANN (1994) genau diskutiert. Bei KRAUS (1984) und FINSTERWALDER (1986) wurden *Gerippllinien* durch die Bestimmung der Richtung der Tangentialebenen gewonnen. Von RIEGER (1992) wurde ein Summationsverfahren zur Extraktion von Gerippllinien entwickelt. Im Abschnitt 6 wird die Extraktion von Gerippllinien (hier Abschlusslinien) mittels Modelle der Krümmungsraumtheorie kurz diskutiert.

Neben den oben erwähnten Typen von zusätzlichen Forminformationen werden die übrigen Arten von Kantenlinien als Bruchkantenlinien bezeichnet. Die wichtigste Aufgabe der Arbeit liegt in der Extraktion von solchen Kantenlinien. Sie sind bei der Beschreibung der Geländeoberfläche bedeutsam.

Die Geländeoberfläche in der Natur ist ganz unterschiedlich. Deswegen werden in dieser Arbeit die in Bildverarbeitungsbereichen bekannten Verfahren untersucht, und daraus wird eine kombinierte Idee zur Extraktion von Strukturlinien entwickelt, die sogenannte *Multi-Resolution, Multi-Channel Method (MrMcMe)*. Unter *Multi-Resolution* wird hier verstanden, dass bei der Extraktion von Strukturlinien unterschiedliche Skalenparameter eingeführt und untersucht werden sollen. Unter dem *Multi-Channel* versteht man hier einerseits, dass unterschiedliche Modelle verwendet werden, andererseits sollen bei den verschiedenen Kantenformen unterschiedliche Verfahren eingeführt werden.

4.2 Grundlagen des Kantendetektors

Die erste Ableitung von Ableitungsoperatoren hat an einer Kante ein lokales Maximum, die zweite Ableitung einen Nulldurchgang. Im zweidimensionalen Grauwertbild werden partielle Ableitungen $\partial f(x, y)/\partial x$ und $\partial f(x, y)/\partial y$ berechnet. Die erste partielle Ableitung ist ein Maß für die Änderung der

Grauwerte und somit für die Kantenstärke. Sie ist am stärksten senkrecht zur Ableitungsrichtung. Aus den räumlichen Ableitungen in den verschiedenen Koordinatenrichtungen können wir einen Vektoroperator, also den Gradientenvektor bilden:

$$\nabla g = \left[\frac{\partial g}{\partial x_1}, \frac{\partial g}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial g}{\partial x_n} \right] \quad (2)$$

Da der Gradient ein Vektor ist, ist sein Betrag

$$|\nabla g| = \left(\sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial x_k} \right)^2 \right)^{1/2} \quad (3)$$

invariant bei einer Drehung des Koordinatensystems. Der Vektor ∇g zeigt in der Richtung der stärksten Änderung und sein Betrag ist umso größer, je stärker die Grauwert-Änderung ist.

Die Filterfunktion wird als Maske geschrieben. Gebräuchlich ist beispielsweise eine rechteckige, kreuzförmige oder näherungsweise kreisförmige Maske. Normalerweise wird eine rechteckige Maske zur Kanten Detektion angewendet. Als eine Auswahl nach Canny-Operator kann man die normierte zweidimensionale Gauß'sche Funktion

$$G_\sigma(x, y) = e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (4)$$

eingeführen und anwenden (CANNY 1986).

In Anlehnung an die klassische Vorstellung eines Kantenoperators, bestehend aus Glättungsfilter und Ableitungsoperator, wird daher die Bildfunktion in kontinuierlicher Form $f(x, y)$ mit den Richtungsableitungen der Gauß'schen Funktion in x- und y-Richtung gefaltet (5):

$$\begin{aligned} D_x(x, y) &= \frac{\partial}{\partial x} (G_\sigma(x, y) \cdot f(x, y)) \\ &= \frac{\partial G_\sigma(x, y)}{\partial x} \cdot f(x, y) \\ D_y(x, y) &= \frac{\partial}{\partial y} (G_\sigma(x, y) \cdot f(x, y)) \\ &= \frac{\partial G_\sigma(x, y)}{\partial y} \cdot f(x, y) \end{aligned} \quad (5)$$

Der Gradient der geglätteten Bildfunktion und die Orientierung der Kantenlinien an der Stelle ergeben sich aus der Gleichung (6).

$$D(x, y) = \sqrt{(D_x(x, y))^2 + (D_y(x, y))^2}$$

$$\Phi(x, y) = \arctan(D_y(x, y)/D_x(x, y)) \quad (6)$$

Unter Orientierung versteht man die Richtung der Tangente an der Kontur, die durch die einzelnen Kantenelemente beschrieben wird. Der Gradient $D(x, y)$ zeigt immer in Richtung des stärksten Anstieges und steht damit immer senkrecht zur Kantenrichtung am untersuchten Punkt (x, y) . Der Skalenparameter (Standardabweichung) σ bestimmt die Glättungsstärke. Durch die Vergrößerung des Parameters und der Filtermasken kann eine größere Glättungswirkung erzielt werden, was den Nachteil einer schlechten Lokalisation der Kante mit sich bringen kann. Darüber hinaus ergeben sich mehrere feine Punkte oder allein stehende kürzere Linien innerhalb einer Kantenlinie, falls dieser Parameter zu klein gewählt wird. Um beide Nachteile möglichst zu vermeiden, kann eine Kanten-Nachbearbeitung ausgenutzt werden, die besteht aus dem Prozess der *Non-Maxima-Suppression* durch die Analyse der Kantenrichtung und -stärke, dem Prozess des *Hysteresis-Threshold-Verfahrens* und einem Prozess des *Constraint-Thinning-Verfahrens*, wenn dies notwendig ist. Im Folgenden werden drei Nachbearbeitungsschritte erläutert.

4.3 Nachbearbeitung

4.3.1 Non-Maxima-Suppression-Verfahren

Eine Kanten-Nachbearbeitung ist die *Non-Maxima-Suppression*. Dabei sollen mögliche Kantenpunkte durch die Unterdrückung der Nicht-Kantenpunkte verstärkt werden. Dieses Verfahren zur Kanten-Nachbearbeitung setzt auf die Informationen der potentiellen Kantenpunkte und der Kantenrichtung bzw. Kantenstärke auf.

Das Verfahren der *Non-Maxima-Suppression* liefert eine bessere Möglichkeit zur Kanten-Nachbearbeitung. Eines davon ist das einfache *Non-Maxima-Suppression-Verfahren*. Bei diesem Verfahren wird ein aktueller Punkt mit seinen Nachbarn verglichen. Falls der Betragsgradient dieses aktuellen Punktes im betreffenden Pixel ein lokales Maximum zeigt, wird dieser Punkt als Kantenpunkt betrachtet. Ansonsten wird dieser Punkt als Nicht-Kantenpunkt gelöscht.

Ein Verfahren wurde von STEINBRECHER (1993) verwendet. Dabei wird der aktuelle Gradientenwert mit zwei angrenzend liegenden Gradientenwerten verglichen, die in Gradientenrichtung, aber auf verschiedenen Seiten des aktuell betrachteten Punktes liegen. Alle Gradientenpunkte sollen mit ihren zwei Nachbargradientenwerten verglichen werden. Falls dieser Punkt ein lokales Maximum besitzt, wird er als ein Kantenpunkt identifiziert. Ansonsten wird dieser Punkt als Nicht-Kantenpunkt gelöscht.

Von STEINBRECHER (1993) wurde auch ein anderes verbessertes Verfahren der *Non-Maxima-Suppression* vorgestellt. Dieses Verfahren geht davon aus, dass die Gradientenrichtung im Allgemeinen nicht genau in Richtung eines Gitterpunktes aus den 8-Punkt-Umgebungen zeigt. Die Kantenrichtung muss dabei angenähert und interpoliert werden. Nach der Annäherungsberechnung der Gradientenrichtung werden dann alle Punkte mit ihren zwei angenäherten auf verschiedenen Seiten liegenden Gradientenwerten verglichen. Falls dieser Punkt ein lokales Maximum darstellt, wird er als ein Kantenpunkt bezeichnet. Ist dies nicht der Fall, wird dieser Punkt als Nicht-Kantenpunkt gelöscht.

4.3.2 Hysteresis-Threshold-Verfahren

Die Abb. 3(b) zeigt ein Ergebnis des Gradientenbetrages der ersten Testdaten. Die Abb. 3(c) stellt das Ergebnis nach dem *Non-Maxima-Suppression-Verfahren* dar. Aus diesem Bild kann man erkennen, dass die Anzahl der potentiellen Kantenpunkte erheblich reduziert wird. Aus diesem Ergebnis

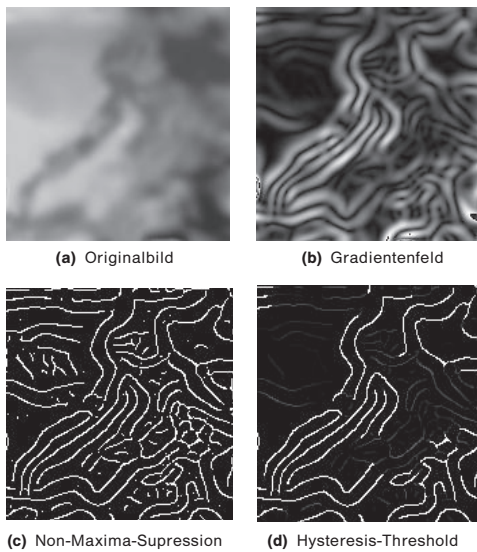


Abb. 3: Nachbearbeitungsschritte.

nach der Non-Maxima-Suppression kann dann durch eine geeignete Schwellwertbildung einfach entschieden werden, ob es sich bei einem Punkt aufgrund seines Gradientenwertes um einen Kantenpunkt handelt oder nicht.

Normalerweise kann man die Schwellwerte interaktiv auswählen. Sinnvoll ist es natürlich, ein quantitatives Verfahren zur Auswahl der Schwellwerte zu entwickeln. Die Abb. 4 (d) stellt ein Ergebnis nach dem Hysteresis-Threshold-Verfahren dar.

Hier wird nicht ein bestimmter Schwellwert, sondern ein *Schwellwertintervall* verwendet. Dabei werden ein hoher Schwellwert TH_{high} und ein niedrigerer Schwellwert TH_{low} eingesetzt. Punkte, an denen der Gradientenbetrag diesen hohen Schwellwert TH_{high} überschreitet, werden verwendet, um neue Konturen zu beginnen, während Punkte mit Gradientenbeträgen über dem niedrigeren Schwellwert TH_{low} der Fortsetzung dienen. Die Kantenpunkte und Konturen unter dem Schwellwert TH_{low} werden dann gelöscht. Die Wahl und Bestimmung beider Schwellwerte entspricht dem *Hysteresis-Threshold-Verfahren*. Die Wahl der beiden Schwellwerte muss nach unterschiedlichen Daten bzw. Bildern getroffen werden.

4.3.3 Constraint-Thinning-Verfahren

Der Grund für die Einführung des *Constraint-Thinning-Verfahrens* liegt darin, dass es in Kombination mit dem Non-Maximum-Suppression-Verfahren manchmal zu Fehlern kommt, wenn sich mehrere Kanten im Einzugsbereich des Operators befinden. Um solche Fehler möglichst zu beseitigen, kann ein Constraint-Thinning-Verfahren nach dem Hysteresis-Threshold-Verfahren eingesetzt werden. Durch STEINBRECHER (1993) wurde dieses Verfahren genau vorgestellt und beschrieben.

4.4 Wahl der Schwellwerte

Eine wichtige Aufgabe der Nachbearbeitung ist die Bestimmung des Schwellwertintervalls beim Hysteresis-Threshold-Verfahren. Dabei sollen ein hoher Schwellwert TH_{high} und ein niedrigerer Schwellwert TH_{low} bestimmt werden. Die Bestimmung zweier Schwellwerte beeinflusst wesentlich die Anzahl der extrahierten Kantenpunkte bzw. Kantenlinien. In der Untersuchung wurde zunächst ein Schwellwert näherungsweise bestimmt, aus dem die beiden Schwellwerte dann berechnet werden. Zur Bestimmung zweier Schwellwerte TH_{high} und TH_{low} sind beispielsweise folgende Methoden zu verwenden:

- Empirische Methode

Beim Non-Maxima-Suppression-Verfahren wird zunächst ein Mittelwert des Gradientenbetrages TH_{mittel} berechnet. Dieser Mittelwert liefert nur einen Näherungswert. Aus diesem Mittelwert werden dann beide Schwellwerte interaktiv festgelegt.

- Histogramm-Verfahren

Ein anderes Verfahren zur Bestimmung der Näherungswerte für die beiden Schwellwerte TH_{high} und TH_{low} geht von der Berechnung des Histogramms nach dem Non-Maxima-Suppression-Verfahren aus. Von LI (1990) wurde das Histogramm-Verfahren zur Bestimmung des Schwellwertes vorgestellt. Zur Herleitung der Schwellwerte wird die Schwellwertaufgabe als Hypothesentest formuliert. Aufgrund der Form des Histo-

gramms können Entscheidungen über günstige Schwellwerte zur Segmentierung getroffen werden. In der vorliegenden Studie konnte der Schwellwert TH_{high} durch Histogrammkurven berechnet werden. Dabei wurde ein *Signifikanzniveau* p eingeführt. Die mit diesem Wert ausgemachte Fläche kann dann als Schwellwert TH_{high} betrachtet werden. Der Schwellwert TH_{low} kann mittels eines empirischen Verfahrens bestimmt werden.

4.5 Bestimmung der Subposition von Kantenpunkten

Die Kantenpunktlokalisierung kann auf Subpixelgenauigkeit gesteigert werden, indem durch drei auf der Gradientenrichtung liegenden Gradientenwerte eine ausgleichende Parabel gelegt wird. Diese Berechnung der Subposition von Kantenpunkten ist besonders von Bedeutung, wenn die Maschenweite (der DGM-Gitterabstand) sehr groß ist.

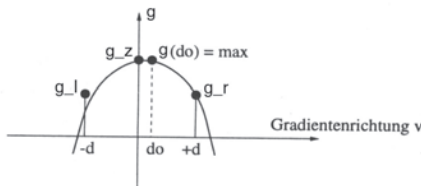


Abb. 4: Bestimmung der Subposition des Kantenpunktes (FUCHS 1998).

Angenommen, dass g_l , g_z und g_r die drei auf der Gradientenrichtung liegenden Gradientenwerte sind (vgl. Abb. 4). Die unbekannt drei Parameter a , b und c der Parabelgleichung $g = av^2 + bv + c$ lassen sich dann aus den drei Gradientenwerten eindeutig bestimmen. Die optimale Subposition eines Kantenpunktes liegt beim Maximum der ausgleichenden Parabel bei $v_0 = d_0$ (vgl. FUCHS 1998).

4.6 Identifizierung der Kantenlinien

Nach dem Hysterisis-Threshold-Verfahren können extrahierte Kantenlinien normaler-

weise schon als *richtige* Kantenlinien bezeichnet werden. Allerdings sollten für manche Anwendungen solche Kantenlinienkandidaten noch nachbearbeitet werden. Es kommt vor, dass *allein stehende* Kantenpunkte bzw. *kürzere* Kantenlinien im extrahierten Kantenbild vorliegen. *Wenn es nötig ist*, können solche Kantenpunkte bzw. kürzere Kantenlinien noch eliminiert werden. Als Kriterium kann die *Länge* der Kantenlinien eingeführt werden. Falls ein extrahierter Kantenlinienkandidat die vorgegebene Kantenlinienlänge (den Schwellwert) nicht überschreitet, wird er eliminiert. Allerdings ist diese Nachbearbeitung je nach *Bedarf* durchzuführen.

5 Ergebnisse der Extraktion von Bruchkantenlinien

Im Folgenden werden einige Ergebnisse mit unterschiedlichen Beispielen von Daten und Bildern dargestellt. Dabei werden zunächst einige DGM-Daten herangezogen und die Extraktion von Bruchkantenlinien gezeigt. Anschließend werden einige Luftbilder beim Test der Extraktion von Gebäudeumrissen und Straßenlinien angewendet.

5.1 Ergebnisse mit DHM-Daten

Die Abb. 5 (a) zeigt ein Ergebnis der Extraktion von Bruchkanten der ersten Testdaten. Das rechte Bild zeigt die digitalisierte Topographische Karte 1 : 25 000. Das linke Bild stellt das Ergebnis von extrahierten Strukturlinien dar. Der verwendete Maßstabsparameter σ beträgt 2,5. Die Abb. 5 (b) zeigt eine Perspektivansicht der entsprechenden Testdaten.

Die Abb. 6 (a) beschreibt ein Ergebnis der Testdaten II. In diesem Gebiet befinden sich ebenso mehrere Böschungen. Darin steht auch ein kleines Teilgebiet mit Nadelwald. Der Maßstabsparameter σ wurde hier mit 3,0 festgelegt. Die Abb. 6 (b) stellt eine Perspektivansicht dieser Testdaten dar.

Die abschließende Abb. 7 beschreibt ein Ergebnis der Testdaten III innerhalb der Topographischen Karte TK 25 Blatt 2833. Die Abb. 7 (a) zeigt einen Teil der extrahierten

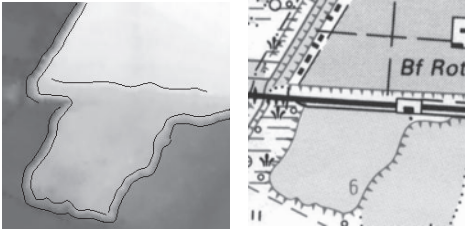


Abb. 5(a): Kantendetektion der Testdaten I (Linke Originaldaten: 250×250 Pixel, DHM-Maschenweite: 2 m).

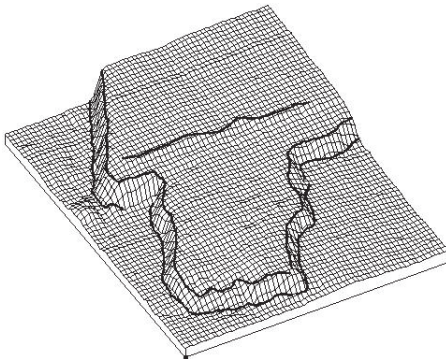


Abb. 5(b): Perspektivansicht der Testdaten I.

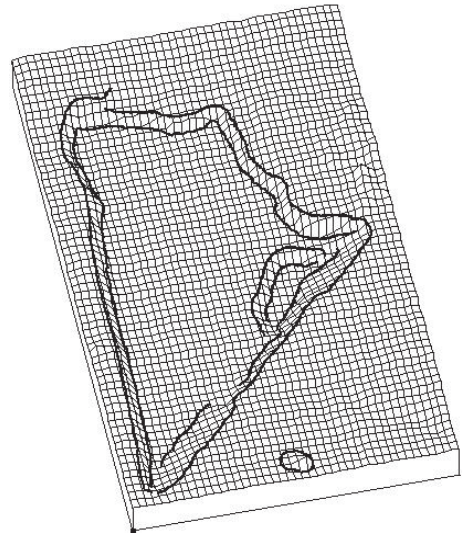


Abb. 6(b): Perspektivansicht der Testdaten II.

Kantenlinien des ganzen Gebietes. Die breiten *Fluss- und Straßenlinien* werden gut detektiert, vor allem auch die Ober- und Unterkanten der Böschungen am Wasserlauf. Die Abb. 7(b) zeigt ein Orthophotobild dieses entsprechenden Teilgebietes.

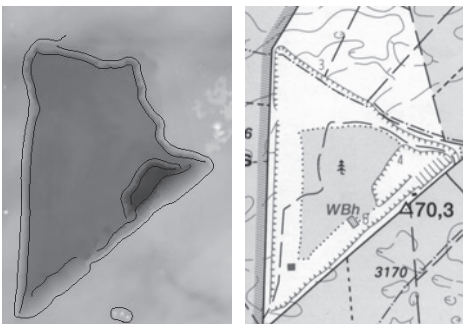


Abb. 6(a): Kantendetektion der Testdaten II (Linke Originaldaten: 200×280 Pixel, DHM-Maschenweite: 4 m).

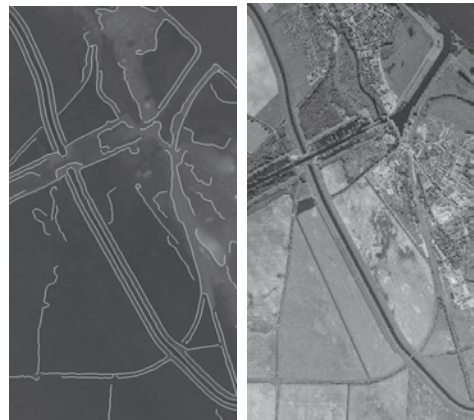


Abb. 7(a): Kantenbild des Testdaten III
Abb. 7(b): Orthophotobild des Teilgebietes (400×760 Pixel, DHM-Maschenweite: 4 m).

5.2 Ergebnisse mit Luftbildern

Die Abb. 8(a) und (b) zeigen einige Ergebnisse mit Daten *flugzeuggetragener Abtastsysteme (Scannerbild)*. Die Originaldaten werden nicht entzerrt und die Auflösung beträgt 2,5 m am Boden. Die Bilder sind mit den extrahierten Strukturlinien überlagert. Die Abb. 8(a) zeigt das Ergebnis der Extraktion der Umrisse von Gebäuden. Die Abb. 8(b) stellt das Ergebnis der Extraktion von Straßenlinien dar. Diese Abbildungen zeigen, dass das entwickelte Verfahren bei der Extraktion von Strukturlinien mit Luftbildern oder Scannerbildern auch gute Ergebnisse erzielen kann.

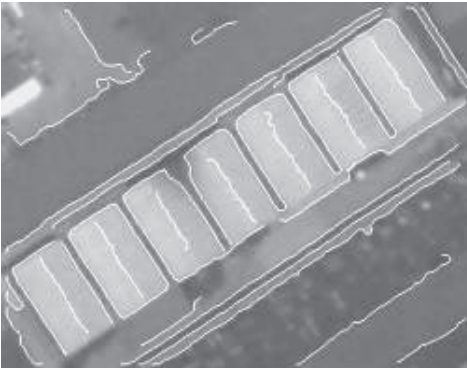


Abb. 8(a): Kantendetektion mit Luftbild (Originaldaten: 456 × 350 Pixel).



Abb. 8(b): Kantendetektion mit Luftbild (Originaldaten: 330 × 325 Pixel).

6 Extraktion von Geripplinien

Die Differentialgeometrie befasst sich mit lokalen Eigenschaften von Kurven und Flächen, die nur vom Verhalten der Kurve oder Fläche in der Umgebung eines Punktes abhängen, sowie dem Einfluss lokaler Eigenschaften auf die gesamte Kurve oder Fläche (JIANG u. a. 1997).

Zur Berechnung der Krümmungsmaße werden in den meisten Fällen zwei Parametrisierungen verwendet, es sollen also zwei Flächendarstellungen berücksichtigt werden (WEIDNER 1994). Falls die lokale Fläche um jeden Bildpunkt mit einer Funktion $f(x, y)$ approximiert wird, so kann die Parametrisierung $(x, y, f(x, y))$ eingesetzt werden; die Bestimmung von Krümmungsmaßen kann also auf der Basis von Flächenapproximationen durchgeführt werden. In einem Höhenbild (in unserem Fall wie DGM-Daten) werden dann die Bildkoordinaten $(x, y, z(x, y))$ als Parameter (χ_1, χ_2, χ_3) verwendet, die Bestimmung von Krümmungsmaßen wird also aus diskreten Flächenpunkten eines Rasters durchgeführt. Die Bestimmung von Krümmungsmaßen aus solchen diskreten Flächenpunkten eines Rasters ist die Aufgabe der Untersuchung. Das Digitale Höhenmodell kann beispielsweise durch

$$\chi = (\chi_1, \chi_2, \chi_3) \quad (7)$$

gegeben sein.

Im Krümmungsraum zeigen Geripplinien eine größte Flächenneigung der Geländeoberfläche. Also stellt eine Geripplinie einen positiven (Maximalkrümmungswert) bzw. negativen Maximalkrümmungswert dar. Basierend auf der differentialen Krümmungsgeometrie können die Gauß'sche und mittlere Krümmung oder maximale und minimale Krümmung wie bei WEIDNER (1995), JIANG u. a. (1997), WILD & KRZYSZEK (1996) angewendet werden. Die Bilder der Abb. 9 zeigen einige Ergebnisse der Extraktion von Geripplinien mit Krümmungsmaßen.

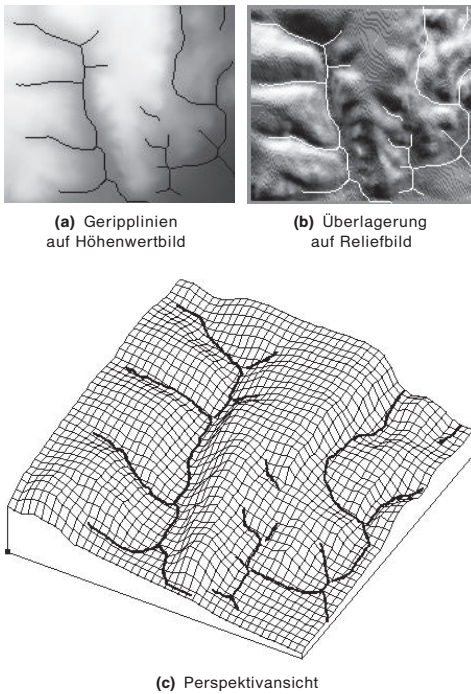


Abb. 9: Extraktion von Gerippllinien mit Laser-scannerdaten.

7 Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsbetrachtung

In der Photogrammetrie, insbesondere in der Digitalen Photogrammetrie ist die Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsuntersuchung bei der Kantenextraktion seit langem ein aktuelles Thema. Von FÖRSTNER (1991) wurde dieses Thema intensiv untersucht. Dort wurden unterschiedliche Kriterien erstellt. Diese Kriterien bestimmten die Lokalisierung und Zuverlässigkeit der Extraktion markanter Punkte. Es ist schwierig, alle Anforderungen zu erfüllen. Die wichtigste Aufgabe besteht darin, unter der Erfüllung der Anforderungen an die *Lokalisation und Zuverlässigkeit die Genauigkeit möglichst steigern und die Verschmierung von Kantenpunkten- bzw. Kantenlinien vermeiden zu können.*

Die Genauigkeit kann durch unterschiedliche Kriterien beschrieben werden (vgl. FÖRSTNER 1991, FUCHS 1998). Die meisten Verfahren von Kantenoperatoren liefern die

Genauigkeit im Pixelbereich. Die Genauigkeitssteigerung ist durch die Bestimmung der Subpixelposition möglich. Die Anwendung dieses Verfahrens bei der Genauigkeitssteigerung in der Digitalen Photogrammetrie und Digitalen Bildverarbeitung kann auch gefunden werden bei CASOTT u.a. (1999), SCHICKLER (1992). Die Genauigkeit und Zuverlässigkeit bei der Kantenextraktion mit DGM-Daten wurden in SUI (2002a) intensiv untersucht. Dort wurde bewiesen, dass die Genauigkeit der Kantenextraktion mit Simulationsdaten durch das vorgestellte Verfahren den Subpixelbereich (0,11 Pixel) erreichen kann. Es wurde auch gezeigt, dass eine Kantenverschmierung bei Simulationsdaten nicht entsteht. Detektierte Kantenpunkte bzw. Kantenlinien wurden gerade in der Pixelmitte lokalisiert. So kann auch festgestellt werden, dass die Zuverlässigkeit mit Simulationsdaten sichergestellt wurde.

Einige Ergebnisse mit realen Daten wurden von SUI (2002a) auch dargestellt. Die Standardabweichung der Verbesserungswerte mit DHM-Daten lag zwischen 0,1606 und 0,2350 Pixel. Für alle dort dargestellten Ergebnisse und Abbildungen wurde die Genauigkeit von Kantenextraktionen veranschaulicht. Durch die Bestimmung der Subpixelposition wurde die Lokalisation besser gewährleistet und die Genauigkeit auf den Subpixelbereich gesteigert. Dies kann durch die in den vergangenen Abschnitten dargestellten Ergebnisse und Abbildungen nachgewiesen werden.

Eine *Kantenverschmierung* kann bei manchen Gebieten vorkommen, wo die Geländeoberfläche einen *glatten* Übergang zeigt und die gemessenen Laserpunkte *nicht genügend dicht* verteilt auf der Geländeoberfläche sind. In diesem Fall kann eine Vorbearbeitung der Kantenverstärkung von DGM-Daten eingeführt werden. Am sichersten ist es, die gemessene Laserpunktdichte zu steigern.

8 Ausblick

Zur Extraktion von zusätzlichen Forminformationen wurden digitale Bildverarbeitungsmethoden angewendet. Das entwickel-

te und realisierte Verfahren zur Extraktion von Strukturlinien erlaubte einerseits auf einfache Weise die Erweiterungen für andere Anforderungen. Andererseits konnten einige Aspekte des Verfahrens auch in anderen Verfahren leistungssteigernd integriert werden. Die extrahierten Strukturlinien verbessern die Qualität eines präzisen digitalen Geländemodells (DGM) und liefern außerdem zusätzliche Informationen für GIS bzw. für die 3D-Rekonstruktion von Objekten.

Erweiterbarkeit: Bei der Konzeption der Kantenlinienextraktion wurden einige Ergebnisse zur Anwendung auf andere Datentypen dargestellt. Die Einführung bzw. die Ergänzung durch Wissen erlaubt die weitere Erweiterung von Verfahren.

Übertragbarkeit: Durch Darstellungen und Beispiele wurde die Übertragbarkeit ebenfalls nachgewiesen. Das entwickelte Verfahren galt für die Anwendung der Extraktion von Umrisslinien mit Luftbildern, kann aber auch für den Mustererkennungszweck mit Panoramabildern usw. eingesetzt werden.

Lokalisation, Zuverlässigkeit und Genauigkeit: Durch die Bestimmung der Subpixelposition hat die Genauigkeit der detektierten Kantenlinien den Subpixelbereich erreicht. Gleichzeitig wurde die Qualität der Lokalisation und der Zuverlässigkeit gesteigert.

Grenzen: Es ist schwierig, ein allmächtiges, vollautomatisches Verfahren zur Kantendetektion zu entwickeln. Die weitere Entwicklung und Verbesserung des Verfahrens kann in der Einführung von Informationen einer topographischen Karte und von Fernerkundungsdaten als Ergänzung liegen.

Danksagung

Diese beschriebenen Untersuchungen wurden am Fachgebiet Photogrammetrie und Kartographie der Technischen Universität Berlin durchgeführt und im Rahmen eines Pilotprojektes vom Landesvermessungsamt Brandenburg unterstützt. Ich bedanke mich insbesondere bei Prof. Dr.-Ing. JÖRG ALBERTZ von der TU Berlin für die Arbeitsmöglichkeiten und bei Dr.-Ing. ECKHARDT

SEYFERT, dem Abteilungsleiter im Landesvermessungsamt Brandenburg, für die Bereitstellung von zahlreichen Materialien von Laserscannerdaten, topographischen Karten sowie Luftbildern. Außerdem wurde die Arbeit auch von den folgenden Stiftungen unterstützt, wofür ich mich ebenfalls ganz herzlich bedanke:

- Otto-Lacmann-Stiftung der TU Berlin,
- Von-Humboldt-Ritter-Penck-Stiftung der Gesellschaft für Erdkunde zu Berlin und
- Hegemann-Stiftung der TU Berlin.

Literatur

- AUMANN, G., 1994: Aufbau qualitativ hochwertiger digitaler Geländemodelle aus Höhenlinien. – DGK Reihe C, Heft Nr. 411.
- BILL, R., 1999: Grundlagen der Geo-Informationssysteme. Band 2, Analysen, Anwendungen und neue Entwicklungen. – 2., völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Wichmann Verlag.
- CANNY, J., 1986: A computational approach to edge detection. – IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 8 (1986), Heft 6.
- CASOTT, N. & PRENTING, J., 1999: Genauigkeitssteigerung beim Korrelationsverfahren in der digitalen Bildverarbeitung. – PFG 1999 (2).
- FINSTERWALDER, R., 1986: Zur Bestimmung von Tal- und Kammlinien. – ZfV 5/1986, 184–189
- FÖRSTNER, W., 1991: Statistische Verfahren für die automatische Bildanalyse und ihre Bewertung bei der Objekterkennung und -vermessung. – DGK Reihe C, Heft Nr. 370.
- FRICTH, D. & KILIAN, J., 1994: Filtering and calibration of laser scanner measurements. – ISPRS Commission III Symposium Munich, WG III/1.
- FUCHS, C., 1998: Extraktion polymorpher Bildstrukturen und ihre topologische und geometrische Gruppierung. – DGK Reihe C, Heft Nr. 502.
- JIANG, X. & BUNKE, H., 1997: Dreidimensionales Computersehen – Gewinnung und Analyse von Tiefenbildern. – Springer-Verlag 1997, Berlin, Heidelberg und New York.
- KILIAN, J., HAALA, N. & ENGLISH, M., 1996: Capture and evaluation of airborne laser scanner data. – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXI, Part B3, Vienna.

- KRAUS, K., 1984: Photogrammetrie Band 2, Theorie und Praxis der Auswertesysteme. – Dümmler Verlag, Bonn.
- KRAUS, K., 1991: Anmerkungen zum Aufsatz von R. FINSTERWALDER über die Genauigkeit digitaler Geländemodelle. – ZfV 1/1991.
- LI, R., 1990: Erfassung unstetiger Oberflächen aus digitalen Bilddaten durch Flächen- und Kantenzuordnung. – DGK Reihe C, Heft Nr. 364.
- LINDENBERGER, J., 1993: Laser Profilmessungen zur topographischen Geländeaufnahme. – DGK Reihe C, Heft Nr. 400.
- RIEGER, W., 1992: Hydrologische Anwendung des digitalen Geländemodells. – TU Wien, Geowissenschaftliche Mitteilungen, Heft 39.
- SCHICKLER W., 1992: Merkmalsextraktion für Meßaufgaben in der digitalen Photogrammetrie. – ZPF 4/1992.
- STEINBRECHER, R., 1993: Bildverarbeitung in der Praxis. – Oldenbourg
- SUI, LICHUN, 1999: Pilotprojekt zur Analyse von Laserscannerdaten mit digitalen Bildverarbeitungsmethoden. – Im Auftrag des Landesvermessungsamtes Brandenburg (unveröffentlicht). Abschlußbericht des Fachgebietes Photogrammetrie und Kartographie der TU Berlin, Juli. 1999.
- SUI, LICHUN, 2002a: Analyse von Laserscannerdaten mit digitalen Bildverarbeitungsmethoden. – Dissertation, Technische Universität Berlin 2002.
- SUI, LICHUN, 2002b: Processing of Laser Scanner Data and automatic Extraction of structure Lines. – ISPRS Commission II, WG VI/4, August 2002.
- WEIDNER, U., 1994: Information-preserving surface restoration and feature extraction for digital elevation models. – Proceedings of ISPRS Commission III, Symposium on Spatial Information from Digital Photogrammetry and Computer Vision, München.
- WEIDNER, U., 1995: Krümmungsmaße. – Institut für Photogrammetrie, Universität Bonn
- WILD, E., 1983: Die Prädiktion mit Gewichtsfunktionen und deren Anwendung zur Beschreibung von Geländeflächen bei topographischen Geländeaufnahmen. – DGK Reihe C, Heft Nr. 277.
- WILD, D. & KRZYSZEK, P.: Automatic breakline detection using an edge preserving filter. – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXL, Part B3, Vienna.

Anschrift des Verfassers:

Dr.-Ing. LICHUN SUI
 Lehrstuhl für Kartographie,
 Technische Universität München
 Arcisstraße 21, D-80333 München
 e-mail: sui@bv.tum.de
 www.carto-tum.de/
 www.fpk.tu-berlin.de/~sui/

Manuskript eingereicht: August 2002
 Angenommen: August 2002