

Extraktion von Eigenschaften der Straßengeometrie aus Laserscannerdaten und vorhandener Geoinformation

CARSTEN HATGER & CLAUS BRENNER, Hannover

Keywords: laser scanning, road parameter extraction, digital road databases, data fusion

Zusammenfassung: Heutige Fahrzeugnavigationssysteme sind hoch entwickelt. Die zu Grunde liegenden digitalen Kartendaten sind flächendeckend verfügbar und hoch aktuell. Fortgeschrittene Anwendungen, z. B. Fahrerassistenz- und Warnsysteme, erfordern jedoch zusätzliche, detailliertere Information über den Straßenverlauf. Attribute wie Höhe, Breite, Längs- und Querneigung sowie die Krümmung des Verkehrsweges müssen zusätzlich erfasst und in die Datenbasis integriert werden. Dieser Artikel zeigt, auf welche Weise diese Eigenschaften mit Hilfe von amtlichen oder privatwirtschaftlich erfassten Geodaten unter Zuhilfenahme luftgestützter Laserscanner-Aufnahmen abgeleitet werden können. Nach einer Einführung in das Problem und der Diskussion des verwendeten Ansatzes erfolgt die Präsentation und Bewertung erster Ergebnisse.

Summary: *Extraction of Road Geometry Parameters from Laser Scanning and Existing Databases.* Today's car navigation systems have reached a high level of maturity, using huge map databases with a high coverage and up-to-date-ness. However, as additional applications gain importance, such as advanced driver information and warning systems, more detailed and accurate information on the true road geometry has to be incorporated into those databases. Properties like height, longitudinal and transversal slope, curvature, and width, which are currently not present, have to be acquired and integrated. This article shows how existing databases either from public authorities or from private map providers can be used in combination with aerial laser scan data to derive such properties. Apart from a general discussion of the problem and our approach, first results are presented and discussed.

1 Einleitung

Viele Problemstellungen des Alltags sind eng mit der Frage nach dem Raumbezug verbunden. Dies gilt insbesondere für die seit 1995 eingeführten Fahrzeugnavigationssysteme. Hier stellt der Raumbezug in Form digitaler Kartendaten eine unerlässliche Grundlage für die Ortung, Routenberechnung und Routenführung dar. Diese Routenführung ist – bedingt durch die zugrunde liegenden Daten – in ihrer Aussage jedoch auf zweidimensionale geometrische und topologische Aspekte beschränkt. Fortgeschrittene Fahrerassistenz- und Warnsysteme benötigen demgegenüber eine deutlich detailliertere und genauere Beschreibung

der Straßengeometrie, beispielsweise in Form von Angaben zur Höhe und Breite sowie zur Längs- und Querneigung des Verkehrsweges.

In Deutschland ist die Höheninformation bundesweit mittels digitaler Geländemodelle (DGM) verfügbar. Sie wird vornehmlich durch die zuständigen Landesbehörden und -betriebe vertrieben. Das vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie vertriebene flächendeckende digitale Geländemodell verfügt über eine Rasterweite von 25 m. Die Lagegenauigkeit ist beschränkt auf 26 m, die Höhengenaugigkeit beträgt 20 m. Nur vereinzelt werden Geländemodelle mit höherer Auflösung und Genauigkeit angeboten. Obwohl Geländemodelle häufig im Planungs-

wesen eingesetzt werden, muss deren räumliche Auflösung für einige Aufgabenstellungen als unzureichend angesehen werden. Wesentlich detailliertere dreidimensionale Beschreibungen der Geländeoberfläche können hingegen mit Hilfe von Laserscanner-Messungen erhalten werden.

Die Anwendungen für hoch auflösende DGM sind vielseitig. Behörden und Betriebe, die mit Entwurf, Planung, Realisierung und Betrieb von Straßen befasst sind, profitieren von einer detaillierten Beschreibung der Geländeoberfläche und mittelbar der Verkehrswege. Chancen bestehen in der präzisen Vorhersage von Schadstoff- und Schallemissionen in Abhängigkeit des Geländeverlaufs. Fahrzeugnavigationssysteme können mithilfe eines DGM optimierte Routen berechnen. Fahrerassistenz- und Warnsysteme nutzen dieses Wissen für die Bereitstellung von Warnungen über das Fahrzeugverhalten im Falle des Durchfahrens enger Kurven und starken Gefälles. Sie berechnen Sichtbarkeiten und passen die Fahrzeugbeleuchtung dem aktuellen Straßenverlauf an. Fahrkomfortfunktionen umfassen die Regelung des Antriebsstrangs und die 3D-Navigation. Schließlich kann die Sicherheit durch aktiven Eingriff in das Fahrgeschehen erhöht werden, beispielsweise indem im Falle einer auf Grund des Straßenverlaufs erkennbaren Gefahrensituation das Fahrzeug rechtzeitig verzögert wird. Derartige Anwendungen werden zurzeit in der Fahrzeugindustrie erforscht.

2 Verwandte Arbeiten

Die Extraktion von Straßen aus raumbezogenen Datenquellen wie Luft- oder Satellitenbildern ist bereits seit mehr als zwanzig Jahren Gegenstand wissenschaftlicher Forschung. Viele Ansätze basieren auf Verfahren der Bildanalyse zur Erkennung von Kanten oder der Texturanalyse (DIAL et al. 2001). Andere Methoden nutzen die dynamische Programmierung oder LSB-Snakes um den Prozess der Extraktion weiter zu verbessern (GRUEN et al. 1997a). In neuerer Zeit haben wissenschaftliche Ansätze zunehmend an Bedeutung gewonnen (HINZ et al.

2001). Die vorhandene Information wird dabei sowohl auf globaler (Konnektivität) als auch auf lokaler (Kontext) Ebene analysiert und entsprechend extrahiert (HINZ & BAUMGARTNER 2002, VOSSELMAN 1997). Daneben kann der Interpretationsprozess durch Hinzuziehen existierender raumbezogener Daten gestützt werden (ZHANG et al. 2001). Vergleichsweise gering ist die Anzahl der Arbeiten, die sich mit der Extraktion von Straßen aus Laserscanner-Aufnahmen befassen. PATNAIK et al. (2003) schlagen vor, diese Technik für die Erfassung von Straßendaten zu nutzen. Auf der Basis von Vorinformation werden relevante Bereiche definiert, innerhalb derer mittels Regressionsverfahren Werte für die Längs- und Querneigung der Fahrbahnoberfläche abgeleitet werden. Des Weiteren beschäftigen sich einige Ansätze mit der Aufdeckung von Diskontinuitäten innerhalb der Geländeoberfläche. WILD & KRZYTEK (1996) und VOSSELMAN (2000) führen zu diesem Zweck Bedingungen wie die Krümmung oder Neigung ein. BRÜGELMANN (2000) verwendet ein Verfahren zur Bruchkantenerkennung, um Deiche in Laserscanner-Aufnahmen zu erkennen.

3 Datenquellen

3.1 ATKIS

Das Amtliche Topographisch-Kartographische Informationssystem (ATKIS) beschreibt und gliedert die Landschaft nach topographischen Gesichtspunkten in einem objektstrukturierten Modell (AdV 1998). Das Digitale Landschaftsmodell (DLM) bildet die Landschaft zweidimensional im Vektorformat ab. ATKIS-DLM Daten sind bundesweit flächendeckend verfügbar.

Verkehrsbezogene Objekte werden als einfache oder komplexe Objekte modelliert. Anhängige Attribute beschreiben die Breite der Fahrbahn oder des Verkehrsweges, die Anzahl der Fahrspuren sowie die Funktion der Straße. In Abhängigkeit der Objektart sind nicht für alle Objekte auch Attributwerte hinterlegt. Die Lagegenauigkeit ist mit besser als 3 m angegeben. Je nach zugrun-

deliegender Datenquelle können allerdings Fehler in einer Größenordnung bis zu 10 m auftreten.

3.2 GDF

GDF (Geographic Data File) ist ein europäischer Standard für digitale Straßendatenbanken (CEN 1995). Der Schwerpunkt dieser Datenbasis liegt auf der Beschreibung der straßengebundenen Verkehrsnetze. Die Spezifikation gestattet die Zuordnung einer Höhenkomponente zu jedem koordinierten Punkt; allerdings wird davon zur Zeit kein Gebrauch gemacht. Der GDF-Standard 3.0 definiert weitere Attribute wie longitudinalen und transversalen Gradient sowie die Durchfahrtshöhe. Die Lagegenauigkeit ist herstellerabhängig und variiert zwischen etwa 15 m in offenem Gelände und 3 m in städtischem Gebiet.

3.3 Laser-Scanner-Daten

Für den hier vorgestellten Ansatz wurden Daten verwendet, die mit einem luftgestützten Laserscanner gewonnen wurden. Für eine Beschreibung des Verfahrens vgl. BALTSAVIAS 1999b. Aus den Rohdaten wird ein digitales Oberflächenmodell (DOM) abgeleitet, das sowohl Bodenpunkte als auch hochgelegene Punkte von Gebäuden und

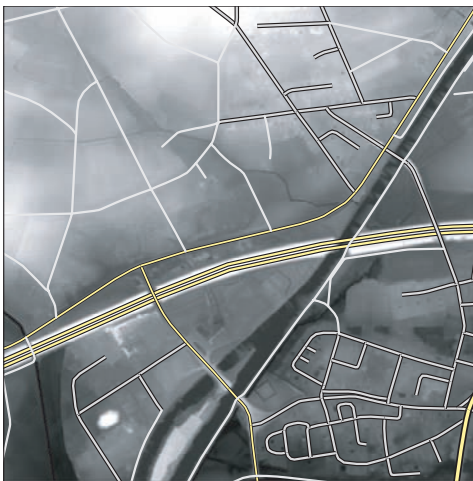


Abb. 1: Testgebiet Castrop-Rauxel

Vegetation beinhaltet. Aus dem DOM wird mit Hilfe geeigneter Verfahren ein hoch auflösendes DGM abgeleitet. Sowohl DOM als auch DGM sind heute verfügbare, kommerziell vertriebene Produkte. Die Punktdichte beträgt etwa vier Punkte pro Quadratmeter. Während die Genauigkeit in der Lage sich auf ca. 0,5 m beläuft (BALTSAVIAS 1999a, LOHR 1999), beträgt sie in der Vertikalen 0,01 bis 0,15 m (BRIESE et al. 2001, WEVER 1999).

Die hier gewählten Testgebiete sind Teile der Städte Stuttgart (Baden-Württemberg), regularisiert mit Rasterweite 1 m und Castrop-Rauxel (Nordrhein-Westfalen), ebenfalls regularisiert, mit Rasterweite 0,5 m. Abb. 1 stellt das Testgebiet Castrop-Rauxel mit überlagerter ATKIS-Information dar. Der Ausschnitt ist so gewählt, dass eine Vielzahl verschiedener Straßentypen enthalten ist. Anliegerstraßen, Feldwege und Landstraßen sind durch graue Liniensignaturen dargestellt, bei den in gelb signaturierten Straßen handelt es sich um Bundesstraßen und Bundesautobahnen.

4 Straßen-Querprofile

Der Entwurf und Bau von Straßen ist in der Bundesrepublik Deutschland an ein umfangreiches Werk von standardisierten Verfahren und Richtlinien gebunden. Von besonderem Interesse sind in diesem Zusammenhang solche Regeln, die den Verlauf und den Querschnitt nach bestimmten Kriterien festlegen. Ein Teil dieser Vorgaben ist in FGSV (1996) im Detail erläutert. Für den Entwurf des Straßenverlaufs stehen drei verschiedene Entwurfselemente zu Verfügung: Geraden, Kreisbögen und Klotoiden. Parametrisierte Entwurfselemente sind derart zu kombinieren, dass nur geringe oder keine Unstetigkeiten in den Ableitungen nullter (C^0 -Lage) oder höherer Ordnung (C^1 -Richtung, Gefälle; C^2 -Krümmung) auftreten. Die Beträge dieser Parameter sind beschränkt, um ein hohes Maß an Fahrkomfort und Fahrsicherheit zu gewährleisten. Zusätzliche Entwurfselemente sind mittels standardisierter Straßenquerschnitte, den sogenannten Regelquerschnitten, gegeben.

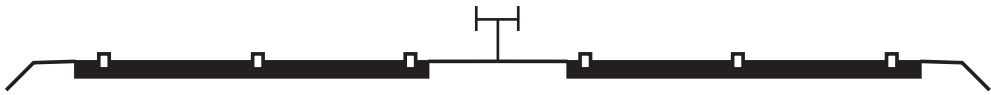


Abb. 2: Regelquerschnitt für baulich getrennte Richtungsfahrbahnen

Die wesentlichen Eigenschaften eines solchen Profils sind neben der Anzahl der Fahrstreifen pro Fahrtrichtung ein ggf. vordringender Trenn- und Standstreifen sowie Bankette. Unter Berücksichtigung der zu erwartenden Verkehrslast sowie der gewählten Straßenfunktion können neun verschiedene Regelquerschnitte im Entwurf verwendet werden. Grafik 2 stellt einen Regelquerschnitt dar, wie er für die Anlage von Kraftfahrstraßen Anwendung findet. Der Querschnitt setzt sich aus insgesamt vier Fahrstreifen, zwei baulich getrennten Richtungsfahrbahnen und zwei Standstreifen sowie Banketten zusammen.

5 Segmentierung von Laserscanner-Daten

Verfahren zur Segmentierung von Laserscanneraufnahmen können sich auf Kontinuitäten oder Diskontinuitäten in den Datensätzen stützen. Klassische Ansätze für die Detektion von Diskontinuitäten sind Punktoperatoren, siehe etwa HARALICK & SHAPIRO 1992, CANNY 1986. Die Extraktion linienförmiger Strukturen wird häufig in einem zweiten Schritt vorgenommen. Hierzu werden Konturen durch die Verkettung von Einzelpunkten gebildet. Alternativ kann eine Diskontinuität senkrecht zu einer linienförmigen Struktur auch als kontinuierliches Phänomen beiderseits der Struktur interpretiert werden (BRÜGELMANN 2000, WILD & KRZYSZEK 1996). Kontinuierliche Strukturen können beispielsweise mittels Bereichswachstumsverfahren extrahiert werden. Wird der Umstand berücksichtigt, dass Liniensegmente durch Punkte, Flächen wiederum durch Liniensegmente berandet werden, können stabilere Ergebnisse erhalten werden, wenn null-, ein- und zweidimensionale Primitive gleichzeitig extrahiert werden. Ein solches Verfahren wird auch als

polymorphe Segmentierung bezeichnet (FUCHS 1998).

Es ist immer wünschenswert, so viel Vorwissen als möglich in den Segmentierungsprozess mit einzubeziehen. Solches Wissen kann sowohl aus den in Abschnitt 4 vorgestellten Entwurfsrichtlinien als auch aus den der Datenquelle zu Grunde liegenden Sensoreigenschaften bestehen. In diesem Fall können glatte Straßenoberflächen mit gewisser Mindestdimension lokal näherungsweise als horizontale Ebenen approximiert werden. Zusätzlich kann die Lage der Fahrbahn unter Verwendung von Vorinformation aus Karten – wie sie in den Abschnitten 3.1 und 3.2 bereits eingeführt wurden – als bekannt angenommen werden. Das Messrauschen des Sensors wird hier mit 0,1 bis 0,2 m angesetzt.

Im Folgenden werden zwei verschiedene Ansätze vorgestellt. Bei Erstem handelt es sich um ein allgemeines, planares Segmentierungsverfahren. Der zweite Ansatz ist speziell auf die Segmentierung von Straßen zugeschnitten.

5.1 Planare Segmentierung mittels eines allgemeinen Bereichswachstumsverfahrens

Allgemein lässt sich der Ablauf von Bereichswachstumsverfahren in drei Phasen gliedern: (1) Finde die beste Saatregion, die ein gegebenes Prädikat erfüllt. (2) Füge weitere, benachbarte Elemente zur Saatregion hinzu, wenn sie das gegebene Prädikat ebenfalls erfüllen. (3) Wenn die Region nicht weiter wachsen kann, nehme das Ergebnis an und verfähre für die verbleibenden Elemente wie vorab (1). Im Fall einer planaren Segmentierung kommen Regionen geringer Krümmung als Saatregionen in Frage. Diese können durch Schätzen lokaler Ebenen ermittelt werden. Das während des Regio-

nenwachstums verwendete Prädikat P ist durch den maximalen Abstand ε des Punktes $p_j = (x, y, z)^T$ zu der der Region zugeordneten Ebene in Hessesnormalform a, b, c, d gegeben, d. h. es muss gelten

$$P(p_j) = \text{TRUE} \Leftrightarrow |ax + by + cz + d| < \varepsilon \quad (1)$$

5.1.1 Gruppierung von Bildzeilen

Ein generelles Problem der Bereichswachstumsverfahren ist die aufwändige Berechnung. Dies rührt daher, dass die Elemente einzeln der Saatregion hinzugefügt werden. Für gewöhnlich ist die Neuberechnung der Ebenengleichung nach jeder Addition erforderlich. Ein schnelles Bereichswachstumsverfahren ist von JIANG & BUNKE (1992) vorgestellt worden. Es ist für regularisierte Rasterdaten konzipiert und nutzt die Eigenschaft, dass bei einer Ebene $z = ax + by + d$ für alle Punkte entlang einer Linie $y = y_0$ die Gleichung $z = ax + by_0 + d$ gilt und damit die Geradengleichung $z = ax + d'$ erfüllt wird. Umgekehrt gilt in den meisten Fällen, dass Punkte, welche die Geradengleichung erfüllen, auch zu genau einer Ebene gehören. Dieser Umstand wird ausgenutzt, um das Wachstum der Regionen nicht elementweise, sondern auf der Basis von kompletten Bildzeilen vorzunehmen. Der Algorithmus stellt sich demnach wie folgt dar. (1) Unterteile jede Bildzeile $y = y_0$ in Segmente, welche die Gleichung $z = ax + d'$ erfüllen. Dies erfolgt durch fortschreitende Unterteilung

einer Bildzeile (DOUGLAS & PEUCKER 1973, DUDA & HART 1973). (2) Finde eine Saatregion durch Untersuchung drei aufeinanderfolgender Bildzeilen y_{i-1}, y_i, y_{i+1} . (3) Füge der gefundenen Saatregion benachbarte Segmente hinzu, solange sie zur gleichen Ebene gehören. (4) Nachbearbeitung: Nach der Gruppierung aller Segmente erfolgt eine Neugruppierung der die Region begrenzenden Punkte, um ein „Ausfransen“ der Ränder zu vermeiden.

Dieser Algorithmus arbeitet schnell und hat in einem Vergleich verschiedener Segmentierungsverfahren sehr gut abgeschnitten (HOOVER et al. 1996). Ein Nachteil besteht in der unterschiedlichen Arbeitsweise in x - und y -Richtung. Durch das Unterteilen innerhalb einer Bildzeile und Gruppierung über mehrere Bildzeilen hinweg ist trotz Nachbearbeitung ein Ausfransen der Ränder einer Region in nur einer Richtung zu erwarten.

5.1.2 Anwendung zur Segmentierung von Straßen

Abb. 3 stellt einige Ergebnisse für die Anwendung des planaren Segmentierungsverfahrens auf Entfernungsbilder dar. Die Bilder (1 m Rasterweite) zeigen einen Teil der Stadt Stuttgart. Die dem GDF entnommenen (hier nicht verwendeten) Straßenmittellachsen sind der besseren Orientierung halber der Grafik überlagert. Abb. 3(a) gibt die Ergebnisse für den „grob“ Parameterwert

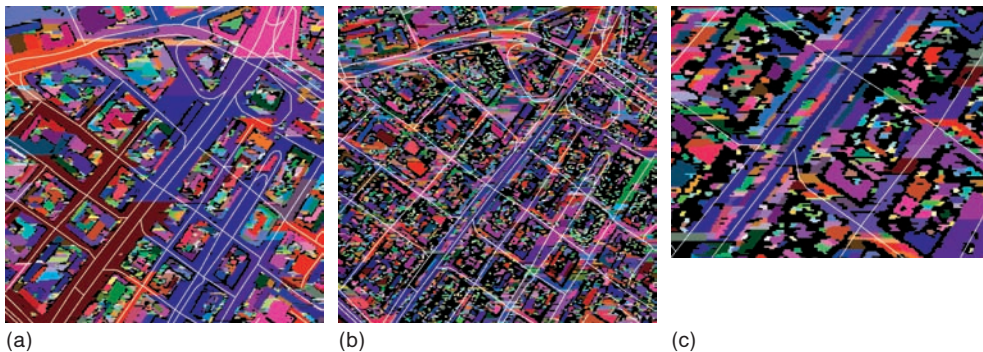
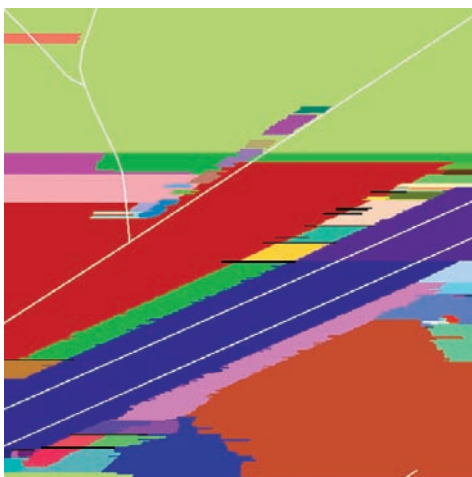


Abb. 3: Segmentierungsergebnisse des Jiang & Bunke Algorithmus. (a) Segmentierungsergebnis mit Einstellung „grob“. (b) Segmentierungsergebnis mit Einstellung „fein“. (c) Detaildarstellung von (b).

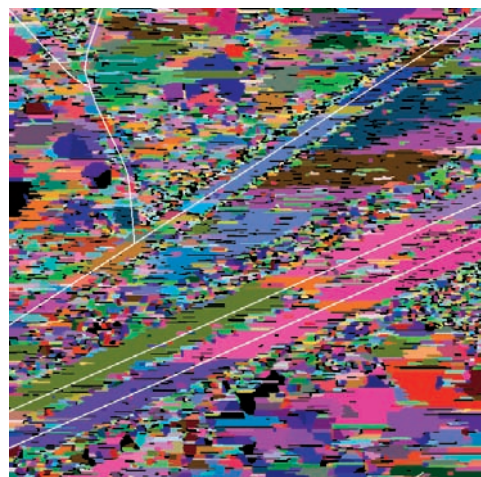
von 1 m für Partitionierung und Gruppierung wieder. Wie der Abbildung zu entnehmen ist, gelingt die Extraktion großer planarer Regionen, von denen die meisten Straßenoberflächen zuzuordnen sind. Gebäude hingegen zeichnen sich durch kleine, fragmentierte Gebiete aus. Wie zuvor erwähnt, sind die linken und rechten Ränder der Regionen erwartungsgemäß ausgefranst, während die oberen und unteren Ränder glatt erscheinen. Da die Eigenschaften des Straßennetzes keine Berücksichtigung finden, kann einem Straßenabschnitt in der Regel mehr als eine Region zugeordnet werden. Eine Verifikation von Straßen könnte erfolgen, indem Regionen entlang eines vorgegebenen Straßennetzes untersucht werden. Die präzise Schätzung des linken oder rechten Randes ist hiermit allerdings nicht möglich. Mit deutlich geringeren, „feineren“ Grenzwerten für die Parameter Partitionierung und Gruppierung im Bereich von 0,1 m ist das Segmentierungsergebnis entsprechend durch eine Vielzahl kleinerer Regionen geprägt, vgl. Abb. 3(b). Trotz der großen Anzahl sind die Straßenoberflächen nach wie vor gut auszumachen. Interessanterweise ist das Verfahren nun bisweilen in der Lage, Richtungsfahstreifen baulich getrennter Fahrbahnen auszumachen.

In offenem, flachem Gelände sind die Ergebnisse nicht so eindeutig, da die Straßen nicht mehr durch die städtische Bebauung flankiert werden. Abb. 4(a) zeigt das Ergebnis für eine Szene, in der eine durch Böschungen begrenzte Bundesautobahn und weitere Straßen enthalten sind, vgl. dazu auch Abschnitt 3.3. Hier können mit der „grob“ Parametrisierung sowohl Böschung als auch Autobahn segmentiert werden, nicht jedoch die anderen Straßen. Mittels „feiner“ Einstellung der Parameterwerte wird erneut eine Vielzahl von Regionen erzeugt, die abermals eine Identifikation der in der Szene enthaltenen Straßenobjekte als schwierig erscheinen lassen, (vgl. Abb. 4b).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das Verfahren zur planaren Segmentierung den Vorteil besitzt, auf keine Vorinformationen angewiesen zu sein. Trotzdem werden Straßen oder sogar einzelne Fahrs Spuren teilweise gut erkannt. Die segmentierten Regionen könnten anhand der aus Vorinformation bezogenen Straßenmittellachsen weiter aggregiert werden. Ein anderer Ansatz besteht in der Verwendung der Straßenmittellachse bereits zu einem früheren Zeitpunkt der Segmentierung. Dies wird im nächsten Abschnitt vorgestellt.



(a)



(b)

Abb. 4: Segmentierungsergebnisse, Auflösung 0,5 m, ländliches Gebiet. (a) Segmentierungsergebnis mit Einstellung „grob“. (b) Segmentierungsergebnis mit Einstellung „fein“.

5.2 Segmentierung entlang von Straßenabschnitten

5.2.1 Ein RANSAC basiertes Segmentierungsverfahren

Wie in Abschnitt 5 bereits gefordert, sollte verfügbare Vorinformation soweit als möglich genutzt werden. In diesem Abschnitt wird vorausgesetzt, dass die digitalisierte Straßenmittellachse innerhalb der Ränder des realen Verkehrsweges verläuft. Diese Vorinformation erlaubt eine empfindlichere Segmentierung der tatsächlichen Ausdehnung der Straße. Für den Fall, dass keine C^0 - (Höhe) oder C^1 -Diskontinuität (Neigung) an den Rändern der Straße vorhanden ist, besteht unmittelbar keine Möglichkeit der Detektion mittels Laserscanner-Daten. In einem solchen Fall muss auf andere Datenquellen wie Luftbildaufnahmen zurückgegriffen werden. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, wie zuverlässig auch kleine Diskontinuitäten aufgedeckt werden können. Eine Straße kann beispielsweise durch Böschungen begrenzt werden, welche recht große Strukturen sind, die zuverlässig extrahiert werden können. Andererseits kann sie auch nur durch eine Bordsteinkante begrenzt sein, so dass zu den angrenzenden Fußgängerwegen oder Verkehrsinseln nur ein Höhenunterschied von 15 cm besteht. In diesem Fall erscheint die Detektion zunächst aussichtslos, da der Betrag in etwa dem Messrauschen des Laserscanners entspricht. Wird die Straße jedoch in Profilen quer zu ihrem Verlauf betrachtet, stehen bei einer angenommenen Breite von 10 m und einer Bodenauflösung von einem Meter durchschnittlich 10 Punkte zur Schätzung der (ebenen) Oberfläche bereit. Für die Standardabweichung des Mittelwertes gilt dann $15 \text{ cm} / \sqrt{10} \approx 5 \text{ cm}$. Bei der Approximation der Straßenoberfläche durch eine Ebene scheint die Detektion demnach möglich. Um das Verfahren so sensitiv als möglich zu gestalten kommt nicht mehr das Verfahren nach JIANG & BUNKE (1992) zum Einsatz, vielmehr wird auf das von FISCHLER & BOLLES (1981) vorgestellte Random Sample Consensus Prinzip (RANSAC) zurückgegriffen.

Der Algorithmus verfährt wie folgt: Zunächst wird die gesamte Straße in Querprofil zerlegt. Anschließend wird je Querprofil aus einer zufällig ermittelten Stichprobe ein Punktepaar gewählt, das die Parameter a , b , c einer Geradengleichung vorgibt. Der Konsens für das Profil ist dann durch die Menge aller Punkte $(x, y)^T$ gegeben, welche die Bedingung

$$|ax + by + c| < \varepsilon \quad (2)$$

erfüllen. Punktepaare, die nicht zu näherungsweise horizontalen Liniensegmenten führen, können leicht entfernt werden, unter Beachtung dass b den Kosinus der Neigung des normierten Normalenvektors $(a, b)^T$ wiedergibt. Aus den verbleibenden Stichproben wird die „beste“ ausgewählt. Als Kriterium hierfür gilt die Länge der größten zusammenhängenden Punktmenge, welche die Straßenmittellachse überlappt.

Zur Zeit werden keine Annahmen über die Breite von Straßen getroffen. Die Schätzung der linken und rechten Straßenseiten erfolgt über einen Medianfilter. Eingabewerte hierfür sind die für die Profile ermittelten linken und rechten Enden der Punktmengen entlang des Straßenverlaufs.

5.2.2 Ergebnisse und Diskussion

Abb. 5 zeigt den Ablauf des Verfahrens an einem Beispiel. Ausgehend von einem beliebigen Straßenabschnitt und dem Geländemodell (Abb. 5a) werden mittels linearer Interpolation Profile rechtwinklig zum Straßenverlauf berechnet (Abb. 5b), Auflösung 0,5 m. Der Höhenunterschied zwischen hellen und dunklen Grautönen beträgt hier lediglich 2 m. Die Anwendung der RANSAC Segmentierung auf jede Bildzeile führt zu einer Folge von Segmenten (Abb. 5c). Nach Anwendung der Medianfilterung erfolgt schließlich die Rückprojektion der Ergebnisse in das Geländemodell zwecks visueller Verifikation (Abb. 5d). Im Beispiel beträgt der Wert für die Konsensfindung nach Gleichung (2) 0,05 m.

Abb. 6 zeigt das Ergebnis für die in Abb. 1 dargestellte Szene. Der Betrag zur Konsens-

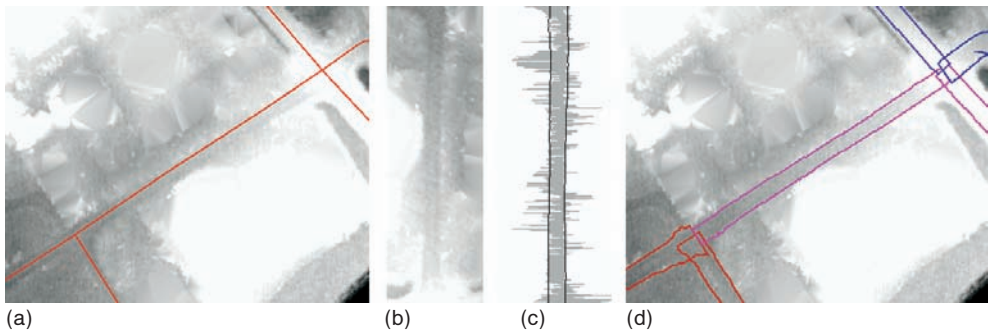


Abb. 5: Profilbasierte Segmentierung entlang der Straßemittelachse. (a) DGM überlagert mit Straßemittelachsen. (b) Transformierter Straßenabschnitt. (c) Ergebnis der bildzeilenbasierten Segmentierung (in grau) und Medianfilterung (in schwarz). (d) Überlagerung des DGM mit dem Segmentierungsergebnis.

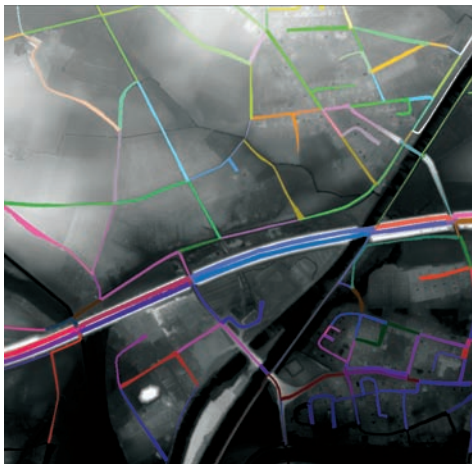


Abb. 6: Segmentierungsergebnisse für das Testgebiet aus Abb. 1.

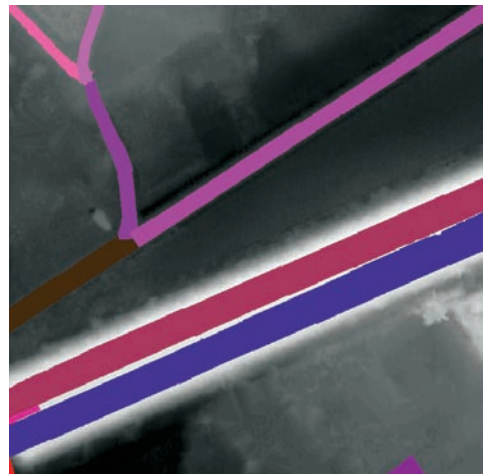


Abb. 7: Detailansicht des Segmentierungsergebnisses für in Abb. 4 dargestellte Gebiet.

findung liegt abermals bei 0,05 m. Eine bemerkenswerte Eigenschaft des Verfahrens ist, dass, obwohl keine Vorgaben über minimale oder maximale Breite eines Straßenabschnittes existieren, die Segmentierung nur in sehr wenigen Fällen ein falsches Ergebnis liefert. Das Verfahren ist auch in der Lage, baulich getrennte Richtungsfahrbahnen im Geländemodell zu verifizieren, vgl. dazu auch Abb. 7. Die Ergebnisse sind jedoch qualitativer Natur und müssen demzufolge noch anhand realer Gegebenheiten überprüft werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurden Methoden für die Kombination existierender Geoinformation mit Laserscanner-Daten untersucht. Ziel ist es dabei, zusätzliche Attribute für zukünftige Straßendatenbanken abzuleiten. Um Straßen in Geländemodellen zu identifizieren nutzt das erste Verfahren einen allgemeinen, planaren Segmentierungsansatz, der auf der Grundlage der Gruppierung von Bildzeilen implementiert ist. Die zweite Methode ist stärker auf die Detektion der Straßengeometrie fokussiert und nutzt die Mit-

telachsen der Straßen sowie eine RANSAC-basierte Segmentierung von Querprofilen.

Auf Grund der Ergebnisse lässt sich schließen, dass Straßenoberflächen in vielen Fällen gut aus Laserscanner-Daten extrahiert werden können. Die planare Segmentierung kann für den Fall, dass die Mittelachse der Straße nicht oder fehlerhaft erfasst wurde, zur näherungsweise Bestimmung der Straßenposition verwendet werden. Demgegenüber kann der profilbasierte Ansatz mit seiner größeren Empfindlichkeit dazu benutzt werden, die Straßenränder auch in relativ flachem Gelände zu detektieren. Voraussetzung hierfür ist allerdings eine relativ genaue Lage der Vorinformation (Straßenmittellachsen).

Eine mögliche Verbesserung besteht in der Erweiterung des profilbasierten Ansatzes auf die Schätzung von Teilflächen entlang linienförmiger Objekte an Stelle der Zerlegung in einzelne Querprofile. Zusätzliches Vorwissen kann in Form der Breite oder der Funktion von Straßen integriert werden. Gegenwärtig werden alle Straßen individuell betrachtet; die Verwendung der Topologie des Straßennetzwerks würde jedoch hier sicherlich Verbesserungen bringen. Schließlich sind auf Grundlage der entwickelten Verfahren quantitative Untersuchungen über die Vollständigkeit und Richtigkeit der erzielten Ergebnisse durchzuführen.

Danksagung

Dank gilt der TopScan GmbH, Steinfurt sowie der Emscher Genossenschaft, Essen für die Überlassung der Laserscanner-Daten. ATKIS-DLM: © Geobasisdaten: Landesvermessungsamt NRW, Bonn, 1116/2002.

Literatur

AdV, 1998: Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem (ATKIS). – Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland.

BALTSAVIAS, E., GRÜN, A. & VANGOOL, L., 2001: Automatic Extraction of Man-Made Objects

from Aerial and Space Images. – Balkema Publishers, Netherlands.

- BALTSAVIAS, E.P., 1999a: Airborne laser scanning: basic relations and formulas. – *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **54** (2-3): 199–214.
- BALTSAVIAS, E.P., 1999b: A comparison between photogrammetry and laser scanning. – *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **54** (2-3): 83–94.
- BRIESE, C., KRAUS, K., MANDLBURGER, G. & PFEIFER, N., 2001: Einsatzmöglichkeiten der Flugzeuggetragenen Laser Scanner. – Tagungsband der 11. Internationalen Geodätischen Woche, Innsbruck, Österreich: 17–26.
- BRÜGELMANN, R., 2000: Automatic breakline detection from airborne laser range data. – *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **XXXIII** (B3): 109–116.
- CANNY, J., 1986: A computational approach to edge detection. – *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **8** (6): 679–698.
- CEN TC 287, 1995: Geographic data files version 3.0, GDF for road traffic and transport telematics. – CEN.
- DIAL, G., GIBSON, L. & POULSEN, R., 2001: Ikonos satellite imagery and its use in automated road extraction. – In: BALTSAVIAS et al., 2001: pp. 357–367.
- DOUGLAS, D. & PEUCKER, T., 1973: Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature. – *The Canadian Cartographer* **10** (2): 112–122.
- DUDA, R.O. & HART, P.E., 1973: *Pattern Classification and Scene Analysis*. – John Wiley and Sons, New York.
- FGSV, 1996: Richtlinien für die Anlage von Straßen (RAS), Teil Querschnitte (RAS-Q 96). – Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Straßenentwurf, Bonn.
- FISCHLER, M.A. & BOLLES, R.C., 1981: Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. – *Communications of the ACM* **24** (6): 381–395.
- FRI TSCH, D. & SPILLER, R., 1999: *Photogrammetrie Week '99*. – Wichmann, Heidelberg.
- FUCHS, C., 1998: *Extraktion polymorpher Bildstrukturen und ihre topologische und geometrische Gruppierung*. – Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn, Institut für Photogrammetrie, Bonn.

- GRUEN, A., BALSAVIAS, E. P. & HENRICSSON, O., 1997: Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images. – Birkhäuser Verlag, Basel, Schweiz.
- GRUEN, A. & LI, H., 1997: Linear feature extraction with 3-d LSB-snakes. – In: GRUEN et al., 1997: pp. 287–298.
- HARALICK, R. M. & SHAPIRO, L. G., 1992: Computer and Robot Vision. – Vol. I., Addison-Wesley, New York.
- HINZ, S. & BAUMGARTNER, A., 2002: Urban road net extraction integrating internal evaluation models. – International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXIV (3A-B): 255–265.
- HINZ, S., BAUMGARTNER, A., MAYER, H., WIEDEMANN, C. & EBNER, H., 2001: Road extraction focussing on urban areas. – In BALSAVIAS et al., 2001: pp. 255–265.
- HOOVER, A., JEAN-BAPTISTE, G., JIANG, X. Y., FLYNN, P. J., BUNKE, H., GOLDFOG, D. B., BOWYER, K., EGGERT, D. W., FITZGIBBON, A. & FISHER, R. B., 1996: An experimental comparison of range image segmentation algorithms. – IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 18 (7): 673–689.
- JIANG, X. Y. & BUNKE, H., 1992: Fast segmentation of range images into planar regions by scan line grouping. – Technical Report IAM-92-006, Institute of Informatics and Applied Mathematics, University of Berne, Switzerland.
- LOHR, U., 1999: High resolution laserscanning, not only for 3d-city models. – In: FRITSCH & SPILLER, 1999: pp. 133–138.
- PATTNAIK, S. B., HALLMARK, S. & SOULEYRETTE, R., 2003: Collecting road inventory using LIDAR surface models. – Proceedings Map India 2003.
- VOSSELMAN, G., 2000: Slope based filtering of laser altimetry data. – International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXIII: 935–942.
- VOSSELMAN, G. & DE GUNST, M., 1997: Updating road maps by contextual reasoning. – In: GRUEN et al., 1997: pp. 267–276.
- WEVER, CH. & LINDENBERGER, J., 1999: Experiences of 10 years laser scanning. – In: FRITSCH & SPILLER, 1999: 125–132.
- WILD, D. & KRZYSZEK, P., 1996: Automatic breakline detection using an edge preserving filter. – International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXI (B3): 946–952.
- ZHANG, C., BALSAVIAS, E. & GRUEN, A., 2001: Updating of cartographic road databases by image analysis. – In: BALSAVIAS et al., 2001: 243–253.

Anschrift der Verfasser:

Dipl.-Ing. CARSTEN HATGER,
 Dr.-Ing. CLAUS BRENNER
 Institut für Kartographie und Geoinformatik
 Universität Hannover, Appelstraße 9a
 D-30167 Hannover
 Tel.: +49-511-762 3726
 Fax: +49-511-762 2780
 e-mail: carsten.hatger@ikg.uni-hannover.de

Manuskript eingereicht: Dezember 2003
 Angenommen: Januar 2004