

Robuste Superpixel-basierte Segmentierung von spektralen Fernerkundungsaufnahmen zur Überwachung der Stadtentwicklung anhand von Straßennetzen

BENJAMIN SEPPKE¹, LEONIE DRESCHLER-FISCHER¹ & CHRISTIAN WILMS¹

Die Überwachung der Stadtentwicklung anhand von Fernerkundungsbildern, die im sichtbaren spektralen Bereich aufgenommen wurden, besitzt im Rahmen der Bildverarbeitung und Szenenanalyse bereits eine lange Tradition. Leider führen gut erforschte, generische Segmentierungsverfahren oft zu nicht-zufriedenstellenden Lösungen. Ein Weg, um dieses Problem zu umgehen, ist der Wechsel der Basisentitäten von Pixeln hin zu Superpixeln, die jeweils lokal kohärente Cluster zusammenhängender Pixel beschreiben. Obwohl diese Superpixel generell flexiblere Algorithmen ermöglichen, benötigen sie dennoch eine Repräsentation, die sowohl geometrische als auch topologische Merkmale beinhaltet, verfügbar macht, und gleichzeitig Operationen, wie z.B. das Verschmelzen von Superpixeln, unterstützt. In dieser Arbeit stellen wir ein derartiges, kombiniertes graphenbasiertes Rahmenwerk vor, den sog. RS-Graphen, und zeigen dessen Verwendung am Beispiel der halbautomatischen Straßenverfolgung. Als Bilddaten wurde für diese Studien auf öffentlich verfügbare Daten zurückgegriffen. Die Anwendung der Superpixel-Methode liefert, verglichen mit anderen Ansätzen, wie z.B. SHUKLA et al. 2002, hervorragende Ergebnisse. So ist das Verfahren beispielsweise robust gegenüber teilweisen Verdeckungen der aufgenommenen Straßen.

1 Einleitung

Die Segmentierung von Fernerkundungsbildern im sichtbaren spektralen Bereich in mehrere Zusammenhangskomponenten besitzt in der Photogrammetrischen Bildauswertung bereits eine lange Tradition. Zudem stellt sie häufig den Ausgangspunkt der Untersuchungen in Bereichen der allgemeinen Bildverarbeitung, der Bildanalyse und der Szeneninterpretation dar. Dennoch kann es je nach Anwendungsfall nur schwer möglich oder sogar unmöglich sein, die gewünschte Segmentierung der Bildsignaturen in einem Verfahrensschritt zu erhalten. Gründe hierfür sind z.B. wechselnde Farbwerte oder Verschattungen der abgebildeten Objekte. Zieht man als Beispiel die Abbildungen von Straßen oder Flüssen heran, so sind die spektralen Signaturen zwar lokal häufig recht ähnlich, können sich global jedoch deutlich voneinander unterscheiden.

Um diese Probleme zu umgehen, stellen wir in dieser Arbeit einen Superpixel-basierten Ansatz vor, der es erlaubt Straßennetze halbautomatisch aus Fernerkundungsbildern zu gewinnen. Der Ansatz beginnt zunächst mit einem übersegmentierten Bild, dessen einzelne Regionen wir als Superpixel benennen. Superpixel bezeichnen im allgemeinen lokal kohärente Cluster benachbarter Pixel, die die (meiste) notwendige Struktur der Segmentierung auf einem zu wählenden Maßstab bewahren (vgl. REN & MALIK 2003). Basierend auf einer neuartigen

¹ Universität Hamburg, MIN-Fakultät, Fachbereich Informatik, Arbeitsgruppe: Szenenanalyse und Visualisierung (SAV), Vogt-Kölln-Str. 30, D-22527 Hamburg, E-Mail: [seppke, dreschler, wilms]@informatik.uni-hamburg.de

geometrisch-topologischen Repräsentation dieser Superpixel, dem sog. RS-Graphen, stellen wir eine Methode zur halbautomatischen Verfolgung von Straßenzügen dar, die eine Verfolgung der Straßensignaturen von Superpixel zu Superpixel ermöglicht. Da Straßen sich hervorragend zur Klassifizierung und Überwachung von urbanen Gebieten eignen, erhalten wir somit einen wichtigen Indikator für die Entwicklung ebensolcher Gebiete. Zudem ist das Verfahren so angelegt, dass es robust gegenüber lokalen Verdeckungen der Straße ist, und eine parallele Verarbeitung erlaubt, um die Ausführung zu beschleunigen und moderne Hardware-Architekturen bestmöglich zu unterstützen.

2 Verwandte Arbeiten

Sowohl die Repräsentation von Bildsegmentierungen als auch die Extraktion und Verfolgung von Straßen in Fernerkundungsbildern werden schon seit geraumer Zeit erforscht. Daher erfolgt in diesem Abschnitt zunächst eine Einführung in die wichtigsten Aspekte beider Gebiete.

2.1 Geometrisch-topologische Repräsentation von Bildsegmentierungen

Nach der initialen Segmentierung eines Bildes in Superpixel ist die naive Repräsentation ein sogenanntes Label-Bild. Hierbei handelt es sich um ein einkanaliges Bild, wobei der Wert jedes Bildpunktes die ID des zugehörigen Superpixels widerspiegelt. Ein solches Bild wird üblicherweise direkt von den Segmentierungsverfahren erzeugt. Es kann allerdings auch nachträglich im Rahmen des Findens der Zusammenhangskomponenten generiert werden. Diese Art der Repräsentation ist allerdings wenig wertvoll, da die einzige direkt zugreifbare Information die Zugehörigkeit von Pixeln zu Superpixeln ist. Falls Fragestellungen, wie z.B. „Welche Superpixel sind direkte Nachbarn von Superpixel 124?“, beantwortet werden sollen, sind erweiterte geometrisch-topologische Repräsentationen nötig.

Eine der ersten derartigen Repräsentationen beschreibt der sog. Regionen-Nachbarschafts-Graph (engl. Region Adjacency Graph, kurz RAG). Dieser ist definiert als ein Graph, in dem die Knoten den Superpixeln entsprechen und die Kanten die Relation „benachbart“ abbilden (vgl. PAVLIDIS 1977). Aufgrund seiner Kompaktheit und einfachen Verständlichkeit findet der RAG auch aktuell noch Anwendung etwa bei Segmentierungsverfahren (vgl. FELZENSZWALB & HUTTENLOCHER 2004 und KROPATSCH 1995). In Bezug auf die möglichen Fragestellungen bleibt der RAG aufgrund seiner Definition allerdings auf Nachbarschaftsanfragen beschränkt.

Um die Beschränkungen des RAG zu überwinden, existieren generell zwei verschiedene Vorgehensweisen. So hat KROPATSCH (1995) eine Repräsentation vorgeschlagen, die Duale Bildgraphen zur Charakterisierung von Superpixeln verwendet. Diese kombinieren, korrigieren und erweitern den Ansatz des RAG mit einem hierzu dualen Graphen.

Einen gänzlich anderen Ansatz verfolgen hingegen die sogenannten Kombinatorischen Karten, die Permutationen verwenden, um die Segmentierung darzustellen. So beschreiben beispielsweise KÖTHE (2002) und MEINE (2009), welche Möglichkeiten und Einschränkungen bei dieser Art der Repräsentation vorliegen. Obwohl beide Arten der Darstellung, die Dualen Graphen und die Kombinatorischen Karten, in der Lage sind die geometrisch-topologischen Zusammenhänge zu beschreiben, sind sie dennoch limitiert. Teilweise stellen sie nicht alle Informationen explizit bereit, führen Hilfskonstrukte ein oder benötigen sehr komplexe

Modellierungen von Verfahren zur Manipulation von Superpixeln, wie z.B. die Verschmelzung zweier Superpixel.

2.2 Straßenverfolgung anhand von spektralen Signaturen

Pixel-basierte Verfahren zur automatischen und halbautomatischen Verfolgung und Extraktion von Straßen anhand spektraler Signaturen auf Fernerkundungsbildern werden bereits seit einiger Zeit erforscht. Einen umfassenden Überblick der verschiedenen Klassen von Verfahren sowie der Verfahren selbst beschreiben MENA (2003) und LI et al. (2009).

Als einen Stellvertreter der Klasse der modellbasierten Verfahren beschreiben GEMAN & JEDYNAK (1996) einen statistisch motivierten Ansatz, der in der Lage ist halbautomatisch Straßen in spektralen Bilddaten zu verfolgen. Hierbei muss zunächst durch den Benutzer ein Ausgangspunkt auf der Straße und eine zu verfolgende Richtung vorgegeben werden. Zudem müssen zwei Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen angegeben werden: eine für die spektrale Verteilung aller Intensitätswerte der Klasse „Straße“ und eine für den negativen Fall. Da diese Wahrscheinlichkeitsverteilungen nicht vorliegen, werden sie oft anhand von Trainingsdaten und überwachten Lernverfahren ermittelt (vgl. GEMAN & JEDYNAK 1996). Laut den Autoren führt diese Vorgehensweise zu vielversprechenden Resultaten. So waren sie unter anderem in der Lage hunderte Kilometer Autobahn zu verfolgen.

Einen anderen Ansatz, der speziell für hochaufgelöste Bilddaten entwickelt worden ist, beschreiben SHUKLA et al. (2002). Wie der bereits erwähnte Ansatz benötigt auch dieser halbautomatische Ansatz als Vorgabe einen Bildpunkt und eine Richtung, in der die Straße verfolgt werden soll. Allerdings benötigt dieses Verfahren kein a priori Wissen über die Wahrscheinlichkeiten der einzelnen spektralen Anteile. Stattdessen wird in diesem Verfahren eine Kostenfunktion definiert, die beschreibt, mit welchen Kosten ein Folgepixel ebenfalls zur Straße gehört. Die Kostenfunktion setzt sich hierbei aus einer Vielzahl von Unterfunktionen zusammen. Die Extraktion der Straße stellt sich anschließend als ein Minimierungsproblem dar: Die minimalen Kosten korrespondieren zu dem extrahierten Pfad, der im Idealfall der abgebildeten Straße entspricht. Ein Hauptkritikpunkt dieses Verfahrens ist die hohe Komplexität und die Verwendung einer Menge von anderen Verfahren und Heuristiken, deren Parameter erst ermittelt werden müssen. So werden beispielsweise mit dem Canny-Verfahren (siehe CANNY 86) Kanten erkannt und anhand eines Schwellenwerts bestimmt, wie breit die zu verfolgende Straße ist. Ähnliches gilt für die Verfolgung an Kreuzungen.

Weitere Ansätze zur Straßenverfolgung verwenden Vorlagen von Straßensignaturen oder Texturen derselben und versuchen diese im Bild zu erkennen (vgl. JIN et al. 2006; LIN et al. 2012). Eine weitere populäre Klasse von Verfahren beschreibt die Straßenverfolgung anhand einer initialen Position und einem Startwinkel sowie einem linearen Änderungsmodell von Bildpunkt zu Bildpunkt. Dieses Modell wird mit einem Kalman-Filter ausgewertet, was ebenfalls in einer Straßenverfolgung resultiert (vgl. ZHOU et al. 2006; MOVAGHATI et al. 2008). Darüber hinaus führen BAUMGARTNER et al. (2002) im Rahmen der Kalman-Filterung orthogonale Profile zur Straßenverfolgung ein.

Anstatt Straßen auf der Pixelebene zu verfolgen bzw. zu extrahieren, erscheint es sinnvoll, die Extraktion auf einer höheren Ebene zu vollziehen, z.B. auf der Ebene der Superpixel. Viele der möglicherweise benötigten statistischen Eigenschaften liegen hier bereits explizit vor. Allerdings

müsste hierfür zunächst eine geeignete Repräsentation zum interaktiven Umgang mit Superpixeln geschaffen werden.

3 Superpixel-Repräsentation mit dem RS-Graph

Um eine Menge von Superpixeln angemessen repräsentieren zu können, wurde in WILMS (2016) eine neuartige Repräsentationsform eingeführt: der sogenannte Regionen-Schalen-Graph (RS-Graph). Im Gegensatz zum RAG, der lediglich die Nachbarschaften der einzelnen Superpixel modelliert, oder anderen Verfahren, wie z.B. MEINE (2009), repräsentiert der RS-Graph nicht nur die Regionen, sondern auch die Schalen an den Kanten der jeweiligen Regionen explizit als Knoten im Graph. Hierbei werden die Bildpunkte an den Grenzen zwischen Superpixeln als Schalen der jeweiligen Regionen bezeichnet. Jeder Superpixel besitzt hierbei jeweils eine eigene Schale zu jedem benachbarten Superpixel, die innerhalb des Superpixels liegt. Eine beispielhafte grafische Darstellung eines RS-Graphen ist in Abbildung 1 gegeben.

Durch die explizite Repräsentation von Regionen und deren Begrenzungen steht mit dem RS-Graphen ein nützliches Werkzeug für eine Vielzahl von Anwendungen zur Verfügung. Zudem führt diese Art der Repräsentation noch zu einem weiteren Nebeneffekt: Durch die reichhaltige Beschreibung ist mit einem RS-Graphen nicht nur die Geometrie, sondern auch die Topologie eindeutig beschrieben. Wo andere Verfahren, wie z.B. KROPATSCH (1995) und KÖTHE (2002), künstliche Konstrukte benötigen, besitzt der RS-Graph eine einheitliche und geschlossene Beschreibung.

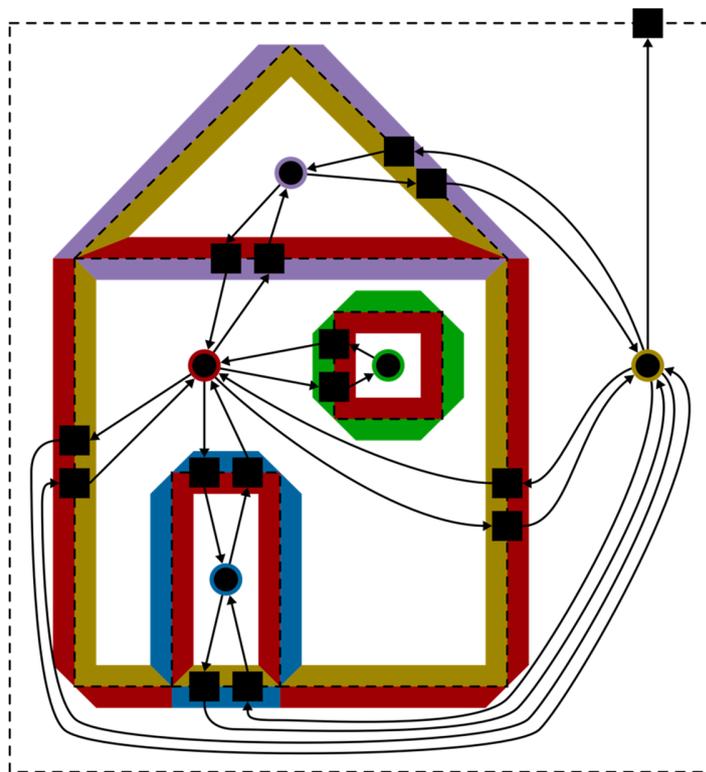


Abb. 1: Beispiel eines RS-Graphen zur Segmentierung eines Hauses anhand von fünf Superpixeln (Punkte). Die Schalen, welche die Superpixel voneinander trennen, sind als Quadrate im Graphen zu erkennen. Oben rechts: Äußere Schale zur Bildbegrenzung.

Weiterhin wurde in WILMS (2016) mithilfe von Verschmelzungsoperationen eine vollständig navigierbare irreguläre Pyramide von Superpixeln implementiert und somit auch verwendbar gemacht. Um die Erstellung der Datenstruktur des RS-Graph anhand eines Label-Bildes zu beschleunigen, wurden einige Schritte parallelisiert sowie auf die Grafikkarte ausgelagert. Somit wird das Potential aktueller Hardware bestmöglich ausgenutzt. Eine detaillierte Beschreibung der Erstellung des RS-Graphen findet sich in WILMS (2016).

4 Superpixel-basierte Straßenverfolgung mithilfe des RS-Graphen

Um die Vielseitigkeit des RS-Graphen zu zeigen, stellen wir im Folgenden eine Vorgehensweise zur Verfolgung von Straßen auf Basis dieser Repräsentation vor. Analog zu den halbautomatischen Verfahren, die in Abschnitt 2.2 beschrieben worden sind, gibt der Benutzer auch bei diesem vorgeschlagenen Verfahren einen Startpunkt und eine Richtung vor. Zudem sollte die Breite der Straße (in Pixel) angegeben werden. Im Anschluss daran wird zunächst das SLIC-Verfahren verwendet, um eine Segmentierung durchzuführen (siehe ACHANTA et al. 2004). Aufbauend auf den so entstandenen Superpixeln wird der RS-Graph erstellt.

Die spektralen Werte der Bildpunkte um den Startpunkt herum werden als initiale Farbwerte der Klasse „Straße“ interpretiert. Anschließend startet das Verfahren ausgehend von dem Superpixel, in dem der Startpunkt liegt. Die Suche nach den folgenden (besten) Verlängerungen der Straße erfolgt analog zu SHUKLA et al. (2002) anhand einer Kostenfunktion c , die sich aus drei Teilen zusammensetzt: Die Funktion c_{angle} bewertet den Winkel des Verlaufs von einem Superpixel zum nächsten, und bestraft zu enge Kurven. Die Funktion c_{border} verwendet die Schaleninformationen des RS-Graphen um festzustellen, ob die Straße überhaupt in die Richtungen der jeweils benachbarten Superpixel weiterführt. Schließlich vergleicht die Funktion c_{region} die spektrale Signatur der benachbarten Superpixel (jeweils die ähnlichsten 20%) mit der der Klasse „Straße“.

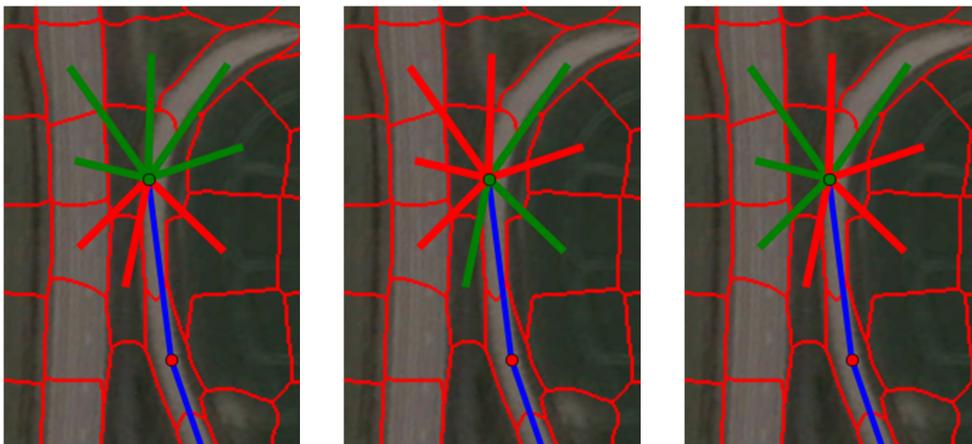


Abb. 2: Ergebnisse der Teilkostenfunktionen, die in der Summe die Kostenfunktion c bestimmen. Von links nach rechts: c_{angle} , c_{border} , c_{region} . Rot: Verlängerung der Straße nicht möglich. Grün: Verlängerung der Straße möglich.

Die einzelnen Kostenwerte werden summiert und führen somit zu einer Rangordnung der möglichen Verlängerungen. Anschließend wird jeweils der Superpixel mit den geringsten Kosten ausgewählt, sofern dieser existiert, andernfalls wird das Verfahren abgebrochen. Falls es mehr als einen Kandidaten zur Verlängerung gibt, werden die Alternativen gespeichert und zur späteren Abzweigungsverfolgung zurückgestellt.

Um die Robustheit des vorgeschlagenen Ansatzes zu verbessern, ist es zudem möglich auch indirekte Superpixel-Nachbarn mit in die Suche einzubeziehen, falls keine passende Verlängerung gefunden werden konnte. Dies ermöglicht auch lokal begrenzte Bereiche, in denen die Straße nicht sichtbar bzw. verschattet ist, zu überspringen. Um die Effizienz des Verfahrens zu steigern, wurde das Tracking zudem soweit möglich parallelisiert.

5 Ergebnisse

Um das entwickelte Verfahren zu testen, wird es auf öffentlich verfügbaren Bilddaten (Google Earth) angewendet und getestet. Die Anwendung auf den Bilddaten zeigt insbesondere die Robustheit des Verfahrens gegenüber Verdeckungen aber auch die Wichtigkeit der Verwendung von Schaleninformationen. In Abbildung 3 ist das Ergebnis einer Anwendung gezeigt, in der die Straße sowohl eine Kreuzung als auch zwei Verdeckungen aufweist.

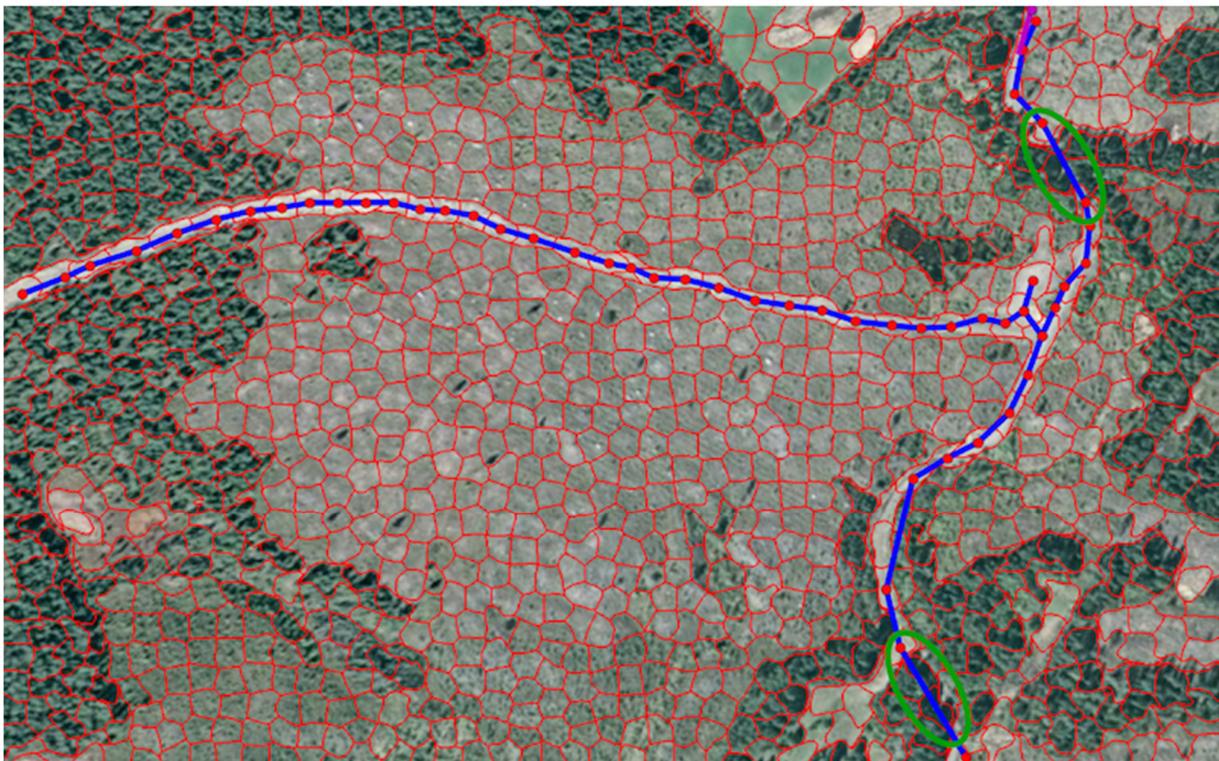


Abb. 3: Ergebnis des vorgeschlagenen Verfahrens zur Straßenverfolgung. Der Startpunkt und die initiale Richtung sind oben rechts (Magenta) markiert. Die Grenzen der SLIC-Superpixel sind in Rot hervorgeben. Die Straße konnte trotz einer Abzweigung und zweier Verdeckungen (Grün) zuverlässig erkannt werden. Bildquelle: Google Earth, Copyright Google Inc.

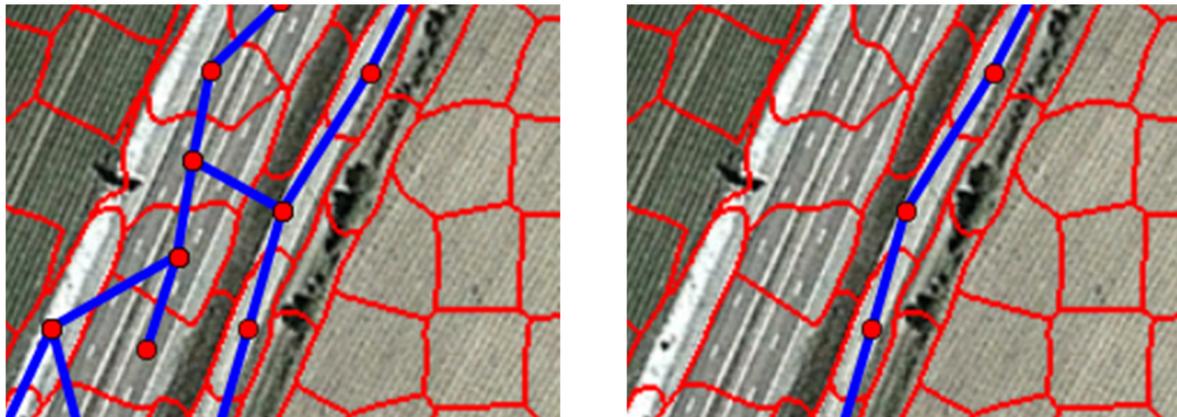


Abb. 4: Einfluss der Verwendung von Schaleninformation in Bezug auf die Kostenfunktion (C_{border}) auf das Resultat der Straßenerkennung. Links: ohne Verwendung von Schaleninformationen, rechts: Ergebnis bei Verwendung von Schaleninformation. Bildquelle: Google Earth, Copyright Google Inc.

In weiteren Untersuchungen wurde das Verfahren zudem in unterschiedlichen ländlichen und städtischen Szenen getestet. Hierbei konnten sowohl unterschiedliche Straßenbeläge als auch Straßen über sich verändernde Umgebungen, z.B. über Brücken hinweg, robust und erfolgreich verfolgt werden.

Um den Mehrwert des vorgeschlagenen Verfahrens in Bezug auf andere Repräsentationsformen wie z.B. den RAG zu erkennen, wird die Kostenfunktion, die auf den Schaleninformationen basiert, nun genauer untersucht. In Abbildung 4 ist ein Teil einer Szene zu erkennen, in der die Straßenverfolgung einmal mit und einmal ohne Zuhilfenahme der Kostenfunktion C_{border} durchgeführt worden ist. Hier wird sofort der große Einfluss der Schaleninformationen auf die Qualität der Straßenverfolgung deutlich. Ohne diese Information über die Trennung zwischen zwei Superpixeln wird die kleine Straße neben der Autobahn während der Verfolgung der Straße fälschlicherweise mit dieser verbunden, da es Superpixel gibt, die über den Grenzbereich hinweg benachbart sind. Nimmt man die Schaleninformationen hinzu, werden derartige Verbindungen unterbunden.

6 Evaluierung

Um die Ergebnisse des vorgeschlagenen Verfahrens quantitativ vergleichen zu können, wurde neben dem vorgestellten Verfahren auch jenes von SHUKLA et al. (2002) implementiert. Dieses ebenfalls kostenbasierte Verfahren stellt als pixelbasiertes Verfahren zur Straßenverfolgung einen guten Kontrast zum vorgeschlagenen Superpixel-basierten Ansatz dar. Für die Evaluierung werden beide Verfahren auf zwei Teilmengen der Testdaten zu je drei Aufnahmen angewendet. Die Bilder der ersten Teilmenge beinhalten allesamt Verdeckungen der Straßen, wohingegen die zweite Teilmenge nur Straßen beinhaltet, die ohne Verdeckungen aufgenommen worden sind. Die Ergebnisse der Evaluierung für diese beiden Teilmengen sind in Abbildung 5 gegeben. Im Gegensatz zu dem Verfahren von SHUKLA et al. 2002 sind hier die Vorteile des vorgeschlagenen Verfahrens sehr deutlich zu erkennen. Solange es keine Verdeckungen auf den Straßen gibt,

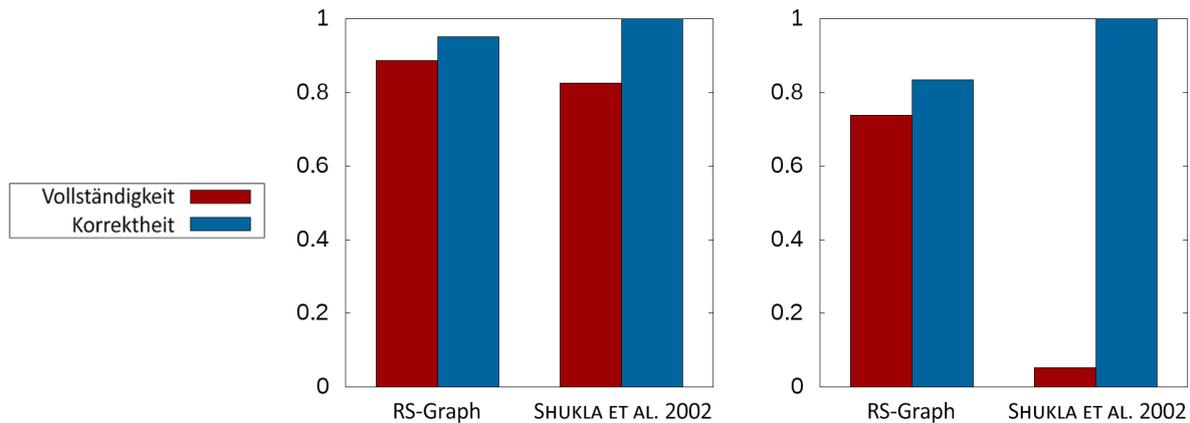


Abb. 5: Vergleich der vorgestellten Methode (RS-Graph) mit dem von SHUKLA et al. (2002) vorgeschlagenen Ansatz zur pixelbasierten Straßenverfolgung auf zwei Testmengen von jeweils drei Bildern. Links: Resultate bei Verwendung von Aufnahmen unverdeckter Straßen, rechts: Ergebnisse bei teilweise verdeckten Straßen.

liegen beide Ansätze etwa gleich auf, sowohl was die Vollständigkeit als auch die Korrektheit betrifft. Allerdings wird hier bereits sichtbar, dass das vorgeschlagene Verfahren stets komplexere Straßenzüge extrahiert – auch wenn diese nicht immer dem Goldstandard (Korrektheit) entsprechen.

Sobald Verdeckungen in den Bilddaten auftreten, wandelt sich dieses Bild noch stärker zu Gunsten des vorgeschlagenen Verfahrens. Zwar extrahiert das Verfahren von SHUKLA et al. (2002) noch einige wenige durchaus korrekte Teile der Straße. Andererseits ist diese Extraktion allerdings in höchstem Maße unbefriedigend, da nur ein verschwindend geringer Teil der Straße ($< 10\%$) extrahiert werden konnte. Hier erzielt das vorgeschlagene Verfahren durch die Möglichkeit des Überspringens von Superpixeln einen deutlich höheren Wert, der nahe an dem Goldstandard liegt.

7 Zusammenfassung und Fazit

In diesem Artikel wurde ein neuartiger, Superpixel-basierter Ansatz zur Verfolgung und Extraktion von Straßen aus spektralen Fernerkundungsbildern präsentiert. Da die Entwicklung von Straßennetzen ein wichtiger Indikator für die städtische Entwicklung ist, ist das Verfahren zudem in der Lage wichtige Daten zur Bestimmung weiterer Kennzahlen bereitzustellen.

Das vorgestellte Verfahren verwendet eine spezielle Art der Repräsentation der Superpixel, den sogenannten RS-Graphen (siehe WILMS 2016). Die Erfordernisse der Anwendung der Straßenverfolgung, die geometrisch-topologische Eigenschaften sowohl über die Superpixel als auch deren Grenzen benötigen, machten diese Art der Repräsentation nötig. Darüber hinaus eignet sich der RS-Graph auch für eine Vielzahl anderer Arten der Merkmalsextraktion (vgl. WILMS 2016).

Die Resultate, die durch das neue Verfahren auf frei verfügbaren Bilddaten erreicht werden konnten, sind allesamt vielversprechend. Im Vergleich mit anderen etablierten Verfahren fällt vor allem die größere Robustheit in Bezug auf die Vollständigkeit auf. Diese kommt

insbesondere dann zum Tragen, wenn die Abbildungen der Straße teilweise Verdeckungen beinhalten. Dieser Vorteil macht das vorgeschlagene Verfahren vor allem in ländlichen bzw. abgelegenen Gebieten besonders gut einsetzbar, da in diesen durch Vegetation natürlicherweise mit Verdeckungen oder Schattenbildung zu rechnen ist. Um die Qualität der Resultate noch weiter zu steigern, könnten zudem weitere Wissensquellen in das Verfahren integriert werden. Da dieses modular angelegt ist, könnte z.B. auch eine Kostenfunktion hinzugefügt werden, die aufgrund von digitalen Geländemodellen einen Ähnlichkeitswert ermittelt. Falls verfügbar, könnten auch bestehende Straßenkarten im Sinne weiterer Kostenfunktionen integriert werden.

8 Danksagung

Diese Forschungsarbeit hat in enger Zusammenarbeit mit dem Weizsäcker Zentrum für Friedensforschung der Universität Hamburg (ZNF) stattgefunden. Ziel der Zusammenarbeit war eine Förderung der Überwachung von Infrastrukturveränderungen in ländlichen Gebieten.

9 Literaturverzeichnis

- ACHANTA, R., SHAJI, A., SMITH, K., LUCCHI, A., FUA, P. & SUSSTRUNK, S., 2004: SLIC Superpixels Compared to State-of-the-Art Superpixel Methods. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **34** (11), 2274-2282.
- BAUMGARTNER, A., HINZ, S. & WIEDEMANN, C., 2002: Efficient methods and interfaces for road tracking. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* **34** (3/B), 28-31.
- CANNY, J., 1986: A Computational Approach to Edge Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **8** (6), 679-698.
- FELZENSZWALB, P.F. & HUTTENLOCHER, D.P., 2004: Efficient Graph-Based Image Segmentation. *International Journal of Computer Vision* **59** (2), 167-181.
- GEMAN, D. & JEDYNAK, B., 1996: An active testing model for tracking roads in satellite images. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **18** (1), 1-14.
- KÖTHE, U., 2002: XPMAPS and Topological Segmentation - A Unified Approach to Finite Topologies in the Plane. *Discrete Geometry for Computer Imagery*, Springer, 22-33.
- KROPATSCH, W., 1995: Building Irregular Pyramids by Dual Graph Contraction. *IEE Proceedings - Vision, Image and Signal Processing* **142** (6), 366-374.
- JIN, X., PASWATERS, S. & DAVIS, C.H., 2006: Road tracking by maximization of mutual information. *Proceedings of the American Society of Photogrammetry and Remote Sensing Annual Conference*, 1-6.
- LI, Y., XU, L. & PIAO, H., 2009: Semi-automatic Road Extraction from High-Resolution Remote Sensing Image: Review and Prospects. *9th International Conference on Hybrid Intelligent Systems* **1**, 204-209.
- LIN, X., SHEN, J. & LIANG, Y., 2012: Semi-Automatic Road Tracking using Parallel Angular Texture Signature. *Intelligent Automation & Soft Computing* **18** (8), 1009-1021.
- MEINE, H., 2009: The GeoMap Representation: On Topologically Correct Sub-pixel Image Analysis. *Universität Hamburg, Imprint Akademische Verlagsgesellschaft* **323**, *Dissertations in Artificial Intelligence*, IOS Press.

- MENA, J. B., 2003: State of the Art on Automatic Road Extraction for GIS Update: A Novel Classification. *Pattern Recognition Letters* **24** (16), 3037-3058.
- MOVAGHATI, S., MOGHADDAMJOO, A. & TAVAKOLI, A., 2008: Using Unscented Kalman Filter for Road Tracing from Satellite Images. *2nd Asia International Conference on Modeling Simulation*, 379-384.
- PAVLIDIS, T., 1977: *Structural Pattern Recognition*. 1st edition, Springer.
- REN, X. & MALIK, J., 2003: Learning a Classification Model for Segmentation. *9th IEEE International Conference on Computer Vision*, IEEE Computer Society, 10-17.
- SHUKLA, V., CHANDRAKANTH, R. & RAMACHANDRAN, R., 2002: Semi- Automatic Road Extraction Algorithm for High Resolution Images Using Path following Approach. *Proceedings of the Third Indian Conference on Computer Vision, Graphics and Image Processing* **2**, 231-236.
- ZHOU, J., BISCHOF, W. F. & CAELLI, T., 2006: Road Tracking in Aerial Images Based on Human-Computer Interaction and Bayesian Filtering. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **61** (2), 108-124.

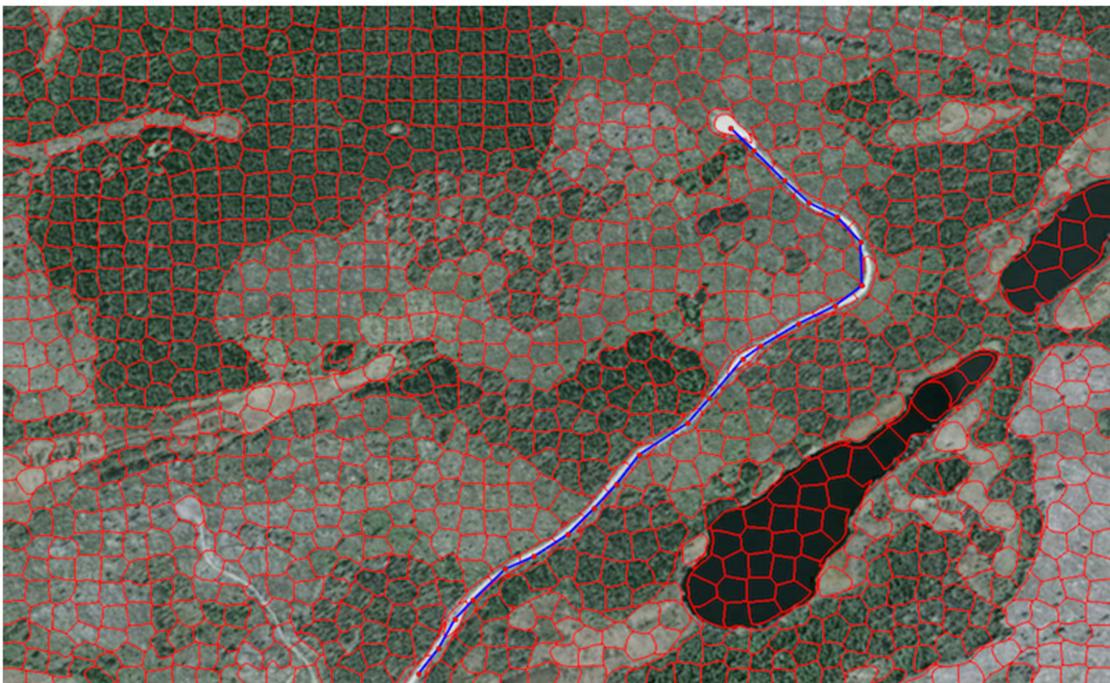
10 Anhang

Im Anhang dieser Arbeit befinden sich zwei weitere Fallbeispiele zur Straßenextraktion. Die Bilddaten stammen, wie die im Text beschriebenen Beispiele, ebenfalls von Google Earth (Copyright: Google Inc.). Neben dem Goldstandard sind zu jedem Fallbeispiel die Geokoordinaten angegeben, um eine Nachvollziehbarkeit der Bilddaten zu gewährleisten.

10.1 Fallbeispiel: Skålbygge (Schweden) – 61°24'54.51" N, 15°04'42.80" E



Goldstandard für Skålbygge mit manuell gesetztem Startpunkt und initialer Richtung (unten).



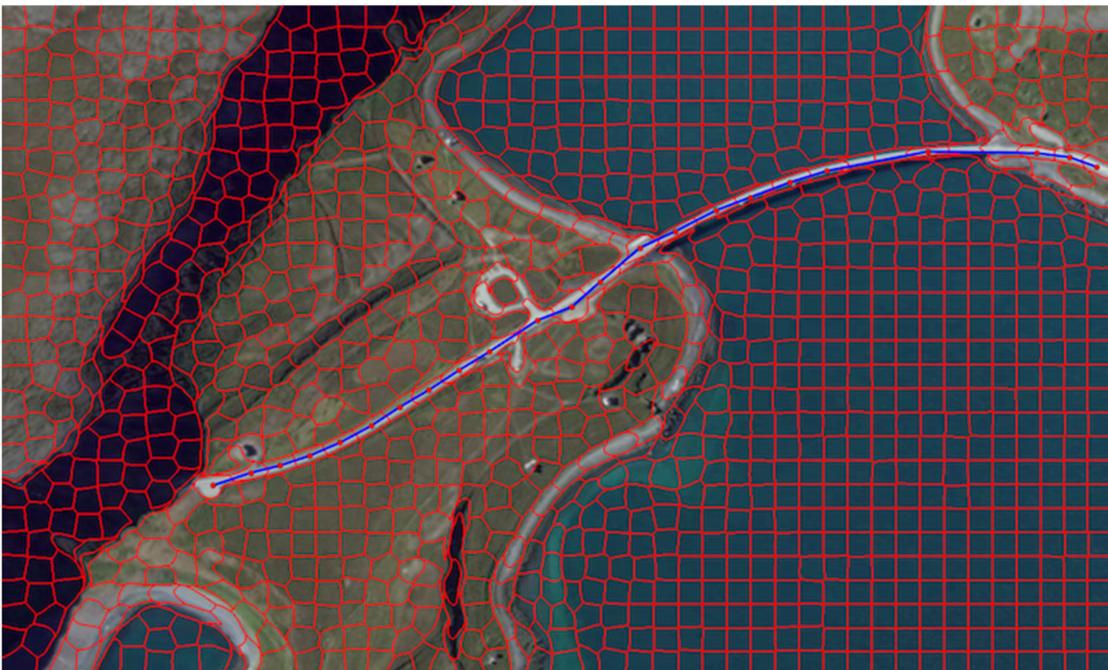
Ergebnis der Straßenverfolgung für Skålbygge. Der blau eingefärbte Kantenzug beschreibt die extrahiert Straße, die roten Punkte die Schwerpunkte der beteiligten Superpixel. Die einzelnen SLIC Superpixel sind durch ihre Begrenzungen rot eingefärbt.

In diesem Beispiel war das vorgeschlagene Verfahren in der Lage, die Straßenverfolgung oben korrekterweise abzubrechen, da dort keine gültige Vervollständigung der Straße möglich ist.

10.2 Nordkap (Norwegen) – 70°57'27.77" N, 25°41'56.54" E



Goldstandard für das Nordkap mit manuell gesetztem Startpunkt und initialer Richtung (rechts).



Ergebnis der Straßenverfolgung für das Nordkap. Der blau eingefärbte Kantenzug beschreibt die extrahiert Straße, die roten Punkte die Schwerpunkte der beteiligten Superpixel. Die einzelnen SLIC Superpixel sind durch ihre Begrenzungen rot eingefärbt.

Der vorgeschlagene Ansatz war in diesem Beispiel in der Lage, dem Straßenverlauf entlang verschiedener Umgebungstexturen auch über eine Brücke hinweg zu folgen.