

RESEARCH

Arnold Bücken

Automatische Modellierung von Waldlandschaften für virtuelle Welten und mobile Roboter

 Springer Vieweg

Automatische Modellierung von Waldlandschaften für virtuelle Welten und mobile Roboter

Arnold Bücken

Automatische Modellierung von Waldlandschaften für virtuelle Welten und mobile Roboter

Mit einem Geleitwort
von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Roßmann

 Springer Vieweg

Arnold Bücken
Aachen, Deutschland

D82 (Dissertation RWTH Aachen University, 2013)

ISBN 978-3-658-06743-4
DOI 10.1007/978-3-658-06744-1

ISBN 978-3-658-06744-1 (eBook)

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

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2014

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.
www.springer-vieweg.de

Geleitwort

Aktuelle Entwicklungen der Robotik "verlassen die Laborumgebung", das heißt die Einsatzgebiete zum Beispiel von Servicerobotik-Applikationen erweitern sich von strukturierten und zuvor genau vermessenen und modellierten Umgebungen auf weniger strukturierte, natürliche Umgebungen. Die Modellierung natürlicher Umgebungen ist aktuell noch eine große Herausforderung, sie ist aber eine wichtige Voraussetzung zum Beispiel für die Lokalisation, Navigation und Aufgabenplanung für mobile robotische Systeme. Die Dissertationsschrift von Herrn Bücken hat zum Ziel, multisensorielle Fernerkundungsdaten zu nutzen, um Waldlandschaften zu identifizieren und so weitgehend automatisch ein Modell einer bewaldeten Landschaft zu erstellen, das unmittelbar die Grundlage für eine Virtual-Reality-Darstellung eines Landschaftsausschnittes realisiert und in zweiter Anwendung als grundlegendes Kartenwerk für die Lokalisation und Navigation automatisierter Arbeitsmaschinen im Wald genutzt wird. Die damit in der Praxis erreichbare Lokalisationsgenauigkeit von ca. 50 cm ist bisher konkurrenzlos.

Die vorliegende Arbeit ermöglicht es, heute global verfügbare Fernerkundungsdaten wie Luftbilder sowie Gelände- und Oberflächenmodelle zu nutzen, um daraus detailgetreue, komplexe Modelle von Waldlandschaften abzuleiten. Die erzielten Genauigkeiten machen es ferner praktikabel, die Ergebnisse nicht nur in Applikationen in den avisierten Bereichen Virtual Reality, Simulation und Robotik einzusetzen, sondern sie ermöglichen darüber hinaus sogar die schrittweise Automatisierung forstlicher Inventur- und Planungsverfahren.

Dieser modernen, fächerübergreifenden und sehr anschaulichen Arbeit, deren Grundidee unter anderem im Jahr 2008 mit dem "European Satellite Navigation Competition 2008 Award" als bester Beitrag des Landes NRW ausgezeichnet wurde, wünsche ich die Ihr gebührende Aufmerksamkeit der Fachwelt und freue mich mit dem Autor über ihren wegweisenden Einfluss auf aktuelle Entwicklungen im Bereich der semantischen Umweltmodellierung.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Roßmann

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Mensch-Maschine-Interaktion der RWTH Aachen.

Dem Leiter des Instituts für Mensch-Maschine-Interaktion, Herrn Prof. Dr.-Ing. J. Roßmann, gilt mein besonderer Dank für die stetige Förderung dieser Arbeit und für die Schaffung der Rahmenbedingungen, die diese Arbeit erst ermöglicht haben.

Herrn Prof. Dr. rer. nat. T. Kuhlen möchte ich herzlich für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Koreferates danken.

Bei den Kolleginnen und Kollegen am Institut für Mensch-Maschine-Interaktion bedanke ich mich für ihre Hilfsbereitschaft und produktive Zusammenarbeit. Erst durch den Kontext der parallel laufenden Arbeiten und der gemeinsamen Arbeit an Projekten war es möglich, den Rahmen für diese Arbeit zu spannen.

Herrn Dipl.-Forstwirt M. Heym, Herrn OFR J. Meißner, Herrn Dipl.-Forstwirt R. Moshhammer, Frau Ass. d. FD. J. Saebel und Herrn FD i.R. G. Spelsberg danke ich für die grundlegende Einführung in die Forsteinrichtung sowie für ihre Hilfsbereitschaft, mir bei verschiedensten forstlichen Fragen mit guten Hinweisen zur Seite zu stehen.

Herrn Dipl.-Inform. M. Giesenschlag danke ich für die fruchtbaren Anregungen nach der Durchsicht des ersten Manuskriptes.

Meiner Familie möchte ich ganz besonders danken. Ohne ihren Rückhalt und die Entbehrungen, die sie auf sich genommen hat, wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Arno Bücken

Inhaltsverzeichnis

Geleitwort	V
Vorwort	VII
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	7
2.1 Einzelbaumerkennung.....	7
2.2 Extraktion und Berechnung von Geländedaten.....	16
2.3 Abgrenzende Geometrien für Waldflächen.....	18
2.4 Generierung von Baumattributen.....	19
2.5 Ableitung forstlicher Attribute aus Fernerkundungsdaten.....	21
3 Datengrundlage	27
3.1 Testgebiet 1: Glindfeld.....	27
3.2 Testgebiet 2: Schmallerberg.....	32
3.3 Testgebiet 3: Arnsberg.....	36
3.4 Testgebiet 4: Hoppengarten.....	42
3.5 Testgebiet 5: Steinfurt.....	45
4 Vorgehen bei der Erzeugung von Waldlandschaften	49
4.1 Bodenmodell.....	49
4.2 Umringe.....	50
4.3 Einzelbaumsegmentierung und Transfer in eine Datenbank.....	55
4.4 Visualisierung.....	55
5 Erhebung von Einzelbaumdaten	57
5.1 Wasserscheidenalgorithmus.....	57
5.2 Volumetrische Baumerkennung.....	60
5.3 Baumerkennung unter Verwendung von Hintergrundwissen.....	70
5.4 Statistische Baumgenerierung.....	76
5.5 Der Schritt zur vollautomatischen Einzelbaumerkennung.....	77
5.6 Einzelbaumattribuierung.....	88
6 Visualisierung	93
6.1 2D-Ansicht von oben.....	93
6.2 3D-Ansicht als Säulen.....	93
6.3 Visualisierung als (ausgerichtete) Textur.....	95
6.4 3D-Ansicht mit realitätsnahen Baummodellen.....	96
6.5 Schatten und Bodenbewuchs.....	97

7	Diskussion	99
7.1	Quantitative Auswertung der Segmentierungsergebnisse	99
7.2	Qualitative Auswertung der Attribuierungsergebnisse	106
7.3	Analyse der benötigten Datengrundlage	115
7.3.1	Analyse der Qualität eines fotogrammetrischen DOMs	116
7.3.2	Analyse der benötigten Auflösung eines LIDAR-DOMs	118
8	Anwendungen	127
8.1	Flugsimulator	127
8.2	Forstsimulator	132
8.3	Lokalisierungsgrundlage	134
8.4	Grundlage für die Baumartenklassifikation	142
8.5	Forstliche Inventuren	142
9	Zusammenfassung	145
	Anhang A – Interpolation	149
	Anhang B – Regressionsergebnisse zur Einzelbaumattribuierung	155
B.1	Ableitung des Brusthöhendurchmessers aus Höhe und Kronenschirmfläche	155
B.2	Ableitung des Alters aus Höhe und Kronenschirmfläche	156
	Anhang C – Ergebnisse der Sensorsimulation	159
	Abbildungsverzeichnis	169
	Tabellenverzeichnis	175
	Abkürzungsverzeichnis	177
	Verzeichnis der Formelzeichen	179
	Literaturverzeichnis	181

1 Einleitung

Simulationen und VR-Umgebungen sind heutzutage realistischer als je zuvor. Durch die steigende Leistungsfähigkeit von Prozessoren und Grafikkarten werden immer detailliertere Visualisierungen der Umgebung und Berechnungen der physikalischen Eigenschaften möglich. Insbesondere bei Simulationen, die zu Unterhaltungszwecken entwickelt wurden, ist diese Entwicklung klar zu sehen. Abbildung 1.1 zeigt die Entwicklung am Beispiel der Flugsimulator-Software des Herstellers Microsoft. Die Darstellung der Umgebung hat sich von einer einfachen Polygon-Grafik über texturierte Szenen bis hin zu einer realistisch anmutenden, weltumspannenden Landschaft gewandelt.



Sublogic Flight Simulator für den Apple II (Bild: [Wikipedia, History of Microsoft Flight Simulator])



Microsoft Flight Simulator I (Bild: [Wikipedia, History of Microsoft Flight Simulator])



Microsoft Flight Simulator 2004 Version 9.0 (Bild: [Wikipedia, History of Microsoft Flight Simulator])



Microsoft Flight 2012

Abbildung 1.1: Grafische Entwicklung der Microsoft Flugsimulatoren und deren Vorgänger Sublogic Flight Simulator

Im Zuge dieser Entwicklung sind auch die Anforderungen an die Modellierung der Landschaft immer höher geworden. Während beispielsweise in der

ersten Version des Sublogic Flight Simulator lediglich einige wenige Höheninformationen für die Knotenpunkte des regelmäßigen Polygonnetzes benötigt wurden und hier auch nur eine begrenzte Fläche betrachtet wurde, ist heute eine realitätsnahe Ausstattung der Umgebung mit 3D-Objekten Standard.

In Städten werden entweder zufällige Gebäude im Stadtgebiet verteilt oder es kommt – in besonders bekannten Städten – ein realistisches, zum Teil manuell erstelltes Stadtmodell zum Einsatz. Bei der Landschaft kommen häufig aus Satelliten- oder Luftbildern generierte Karten mit einer Information über die Nutzung und Vegetation des Bodens zum Einsatz, die auf ein grob aufgelöstes Höhenmodell gelegt werden. Beim Höhenmodell findet man oft das Höhenraster der SRTM-Mission des Space-Shuttles [Avsim.com, 2008 und Jet Propulsion Laboratory, 1998], da dieser Datensatz nahezu flächendeckend frei verfügbar ist. Die Verwendung der Bodennutzungskarten ist meist nicht näher dokumentiert. Ein Beispiel für ein sehr detailliertes Verfahren gibt das CORINE-Landcover-Projekt [Keil, Bock, Esch, Metz, Nieland, Pfitzner, 2010]. Abbildung 1.2 zeigt ein Bildschirmfoto aus Microsoft Flight (veröffentlicht 2012), das die Verwendung solcher Karten verdeutlicht.



Abbildung 1.2: Verwendung von Bodennutzungs- und Vegetationskarten in Microsoft Flight. Die Übergänge zwischen verschiedenen Landnutzungszonen bestehen aus Polygonen. Straßen und Gebäude werden geschnitten.

Auch im professionellen Umfeld kommen Simulatoren zum Einsatz, die eine realitätsnahe Umgebung erfordern (Abbildung 1.3). Beispiele sind hier kommerzielle Flug-, Fahr- oder Arbeitsmaschinensimulatoren. Insbesondere Forstmaschinensimulatoren erfordern eine sehr realistische Umgebung bis auf Einzelbaumebene, um zum Beispiel das Fahrertraining unter realitätsnahen Bedingungen zu ermöglichen. Aber auch in Flugsimulatoren ist eine detaillierte Modellierung insbesondere in der Umgebung der Flughäfen sehr wichtig, um den Flugschüler unter Sichtflugbedingungen (VFR) auszubilden.



Lufthansa Flugsimulator (Bild: [Ziegler, 2011])



Simutech Fahrsimulator (Bild: [Simutech, 2012])



Arbeitsmaschinensimulator (Bild: T. Jung, MMI)



Harvester-Simulator (Bild: Herzberg, Universität Dortmund)

Abbildung 1.3: Verschiedene kommerzielle Simulatoren

Zum Teil kommen in diesem Bereich von Hand generierte Landschaftsmodelle zum Einsatz, die nicht oder nur in geringen Teilen mit einer realen Landschaft übereinstimmen. So wird zum Beispiel die Morphologie der Landschaft übernommen, die Vegetation jedoch ohne Anspruch auf einen Realitätsbezug manuell generiert. Die so erzeugten Modelle wirken zunächst einmal plausibel, der Aufwand solche Modelle großflächig zu erstellen ist jedoch immens und, obwohl die Modelle in sich stimmig wirken, können Aspekte der

tatsächlichen Landschaft nicht abgebildet sein, was je nach Simulator oder je nach Schulungsaufgaben die Anforderungen an den Bediener verfälschen kann.

Mit der zunehmenden Verfügbarkeit von Fernerkundungsdaten erscheint es sinnvoll, die (teil-)automatisierte Generierung von Landschaften anzustreben. Während Luftbilder früher meist nur für spezielle Aufgaben lokal beschränkt erstellt wurden, werden diese heute in festgelegtem Turnus routinemäßig und flächendeckend aufgenommen (Beispiel NRW: [GEObasis.nrw, Bildflugnachweis, 2012]). Im Alltag haben diese Bilder längst ihren festen Platz gefunden und werden beispielsweise in Internetdiensten wie Google Maps, Microsoft Bing Maps oder Google Earth genutzt. In einigen Gebieten, wie beispielsweise in Nordrhein-Westfalen, werden inzwischen zusätzlich auch präzise Höhenmodelle turnusmäßig erhoben [GEObasis.nrw, Digitales Oberflächenmodell (DOM), 2012]. Bei einer Befliegung mit einem Laserscanner wird nicht nur die Vegetationsoberfläche abgebildet. Dieser aktive Sensor penetriert die Oberfläche und liefert gleichzeitig Informationen über tieferliegende Schichten. So kann gleichzeitig eine Abbildung des Geländes (DGM – digitales Geländemodell) und der Bewuchsoberfläche (DOM – digitales Oberflächenmodell) erzeugt werden. Diese raumbezogene Datengrundlage stellt einen nahezu idealen Rahmen für die Generierung von Landschaftsmodellen dar.

Neben Simulationen und Visualisierungen im Bereich der virtuellen Realität sind realitätsnahe Waldmodelle auch in weiteren Feldern eine wichtige Datengrundlage. Beispielsweise kann ein einzelbaumbasiertes, aus Fernerkundungsdaten erstelltes Waldmodell im Bereich der mobilen Robotik als Kartengrundlage genutzt werden, um ein robotisches System auch unter dem Kronendach zu lokalisieren. Auch bereits bei der Planung eines Einsatzes einer Maschine im Wald steht einem Disponenten mit einem detaillierten Waldmodell eine Grundlage zur Verfügung, mit der sich das Gelände und der Bewuchs umfassender als mit herkömmlichen Kartenwerken einschätzen lassen.

Im forstlichen Bereich ermöglichen präzise Waldinformationen eine automatisierte Übersicht über den Wald. Aus digitalen Waldmodellen können für große Flächen Inventurparameter abgeleitet werden, die als Planungsgrundlage in der Forsteinrichtung dienen können.

Diese Arbeit soll einen Weg aufzeichnen, wie Fernerkundungsdaten zur teilautomatischen oder automatischen Akquise von Waldmodellen genutzt werden können. Zunächst sollen bereits publizierte Ansätze der automatischen Modellgenerierung für VR-Systeme betrachtet und diskutiert werden. Hier sind insbesondere Ansätze für die Generierung von Stadtmodellen sowie von Landschaften mit Straßen und Wegen publiziert. Weiterhin sollen bekannte Ansätze

zur Einzelbaumerkennung betrachtet werden, die hauptsächlich in der Forstwissenschaft zum Einsatz kommen.

Anschließend sollen die Geodaten, die dieser Untersuchung zugrunde lagen, beschrieben werden. Hier standen Daten aus den Testgebieten Glindfeld, Schmallenberg, Arnsberg, Hoppengarten, Steinfurt zur Verfügung. Dabei ist eine Gesamtfläche von ca. 1320km² abgedeckt. Die zur Verfügung stehenden Daten unterscheiden sich dabei in verschiedenen Aspekten, unter anderem hinsichtlich der Entstehungsart beziehungsweise der eingesetzten Sensoren und der Auflösung.

Im dann folgenden Kapitel wird das verwendete, generelle Vorgehen bei der Generierung von Waldmodellen vorgestellt. Dazu wird insbesondere aufgezeigt, aus welchen Geodaten die von einer Einzelbaumerkennung benötigten Informationen abgeleitet werden können. Das Vorgehen ist hier stark modular aufgebaut, sodass einzelne Abläufe hier jederzeit gegen andere Algorithmen ausgetauscht oder die Ansätze auf andere Datenquellen angepasst werden können.

Zentraler Punkt in diesem Ablauf ist die eigentliche Einzelbaumerkennung, die durch die verschiedensten Algorithmen erfolgen kann. Die hier verwendeten Algorithmen sollen anschließend in einem eigenen Kapitel eingeführt werden. Hierzu wird zunächst das in der Literatur oft zitierte Verfahren des Wasserscheiden-Algorithmus ausführlicher vorgestellt. Anschließend werden zwei neue Algorithmen zur Einzelbaumerkennung entwickelt. Neben den Einzelbaumerkennungsansätzen soll auch ein Verfahren eingeführt werden, das in Gebieten mit einer unzureichenden Geodatenabdeckung immer noch plausible, wenn auch nicht eins zu eins mit der Realität übereinstimmende Waldmodelle erzeugen kann.

Nach diesem Kapitel stehen die benötigten Werkzeuge bereit, um ein Waldmodell teilautomatisch zu erstellen. Es zeigt sich, dass lediglich ein freier Parameter der Einzelbaumerkennung bleibt und je Waldstück manuell gesetzt werden muss. Um den letzten Schritt zu einer vollautomatischen Waldmodellierung zu vollziehen, wird anschließend mit der Receiver-Operator-Charakteristik ein Ansatz vorgestellt, der eine Heuristik zur Bestimmung des freien Parameters liefert.

Das darauffolgende Kapitel analysiert die Ergebnisse der Einzelbaumerkennung. Für Testbestände werden die Ergebnisse der Einzelbaumsegmentierung mit einer terrestrischen Vollaufnahme verglichen, um eine Erkennungsrate zu ermitteln. Dies erfolgt zum einen für einen teilautomatisiert erstellten Datensatz, zum anderen aber auch für das Ergebnis einer vollautomatischen Segmentierung.

Anschließend soll analysiert werden, wie verschiedene Befliegungsparameter die Erkennungsrate beeinflussen. Hierzu werden verschiedene Oberflä-

chenmodelle per Sensorsimulation erzeugt, die anschließend zur Einzelbauererkennung genutzt werden. Auf diese Weise wird schnell klar, wie eine geänderte Punktdichte oder eine größere Strahlaufweitung des Laserstrahles die Erkennungsergebnisse beeinflussen. Die Simulationsergebnisse werden dabei auch mit einem real gemessenen Datensatz verglichen, um zu zeigen, dass diese plausibel sind.

Nachdem die Modellerstellung beleuchtet wurde, folgt ein kurzer Abriss über die Möglichkeiten der Datenvisualisierung. Von einfachen Stöckchenmodellen bis hin zur komplexen, nahezu fotorealistischen Darstellung des Waldes gibt es verschiedene Ansätze. Abschließend sollen einige Nutzungsmöglichkeiten eines vollautomatisch aus Fernerkundungsdaten erzeugten, hochdetaillierten Waldmodells in den Bereichen der virtuellen Welten, der mobilen Robotik und der Forstwissenschaften aufgezeigt werden.

2 Stand der Technik

Systeme, die die Generierung von Waldmodellen für VR-System aus Fernerkundungsdaten beschreiben, sind bisher nicht in der Literatur beschrieben. Es finden sich jedoch zahlreiche Veröffentlichungen, die Teilbereiche des hier erforderlichen Ansatzes beschreiben.

Diese Teilbereiche sollen in diesem Kapitel beleuchtet werden. Der sicherlich zentrale Aspekt ist dabei die Erkennung von Einzelbäumen in Fernerkundungsdaten. Allerdings sind auch die Extraktion und Verarbeitung von Geländedaten, die Herleitung von abgrenzenden Geometrien, die Generierung von Baumartenkarten, sowie die Analyse, welche forstlichen Daten aus Fernerkundungsdaten abgeleitet werden können, im Umfeld einer automatischen Waldgenerierung von Interesse.

2.1 Einzelbaumerkennung

Im Bereich der Einzelbaumerkennung sind in der Literatur zahlreiche Verfahren zu finden, die auf verschiedenen Ansätzen basieren. Insbesondere im forstlichen Bereich sind hier Veröffentlichungen zu finden. Die meisten davon stammen von Forschergruppen aus den walddreichen Ländern Skandinaviens sowie aus Kanada.

Nachdem bereits Ende der 1970er Jahre von Solodukhin in ersten Untersuchungen die Eignung flugzeuggetragener Laserscanner zur Ableitung forstlicher Parameter eines Bestandes beziehungsweise einer Baumgruppe betrachtet wurden [Solodukhin et. al., 1977 und Solodukhin et. al., 1979], folgten Ende der 1990er Jahr mit gestiegenen Auflösungen der verfügbaren Laserdaten die ersten Auswertungen zur Segmentierung von Einzelbäumen.

Gougeon beschreibt bereits 1998 einen Ansatz zur Extraktion von Einzelbaumdaten aus Fernerkundungsdaten über einen Algorithmus, der lokale Minima verfolgt und daraus Strukturen ableitet („Valley-Following-Algorithmus“) [Gougeon, 1998]. Er nutzt hier digitale oder digitalisierte Luftbilder mit einer Auflösung bis zu 10cm/Pixel und schließt aus Schattenbereichen auf Kronengrenzen und daraus auf individuelle Bäume. In seiner Veröffentlichung schildert Gougeon sehr gute Ergebnisse ab einer räumlichen Auflösung von ca. 30cm/Pixel, beschreibt jedoch lediglich, dass 81% der erkannten Kronen tatsächlich 1:1 mit realen Kronen übereinstimmen. Es fehlt eine Angabe, wie hoch der Prozentsatz der erkannten Bäume war.

In einer umfassenderen Arbeit [Gougeon und Leckie, 2003] wird der dieser Ansatz als Möglichkeit beschrieben, Luftbilder in der Vorstufe einer Klassi-

fizierung zu segmentieren. Zur Abschätzung der Anzahl und Positionen von Einzelbäumen wird die Suche von lokalen Helligkeits-Maxima in Luftbildern beschrieben. Mit dem TREETOPS-Algorithmus wird ein grob aufgelöstes (1-2m/Pixel), manuell vorprozessiertes Bild gescannt und dabei innerhalb eines festen Ausschnittes der hellste Pixel bestimmt. Dieser wird als Spitze eines Baumes angenommen. Es erfolgt keine Unterteilung in Kronenspitze und Astspitze eines bereits erfassten Baumes, was aufgrund der geringen räumlichen Auflösung des Bildes vermutlich auch nicht erforderlich ist. Für offenes Gelände wird zusätzlich der SHADOWTT-Ansatz beschrieben, der nach Eingabe des Sonnenstandes bei der Bilderstellung anhand des Schattenwurfs Baumpositionen bestimmt. Beide Situationen – offener und dichter Bestand – können vom LATTOPS-Ansatz unterschieden werden, sodass der jeweils bessere Algorithmus gewählt werden kann.

In [Gougeon, 2009] werden die Ergebnisse auf die Nutzung von Satellitendaten ausgeweitet. In [Katoh, Gougeon, Leckie, 2009] wird auf Probleme eingegangen, die durch die feste Größe des betrachteten Ausschnitts auftreten. So werden große Bäume oft in mehrere Teile segmentiert, während Bäume mit kleiner Krone nicht getrennt werden. In [Gougeon, 2010] wird der bisherige Ansatz auf eine Verwendung von Laserscanner-Daten erweitert. Im Falle einer niedrigen Auflösung (ca. 1 Punkt / m²) können die Daten genutzt werden, um die Höhe der erkannten Bäume zu bestimmen und um Bereiche mit niedriger oder nicht vorhandener Vegetation zu erkennen und von der Berechnung auszuschließen. Laser-Daten mit hoher Auflösung (ca. 10 Punkte / m²) werden hier als geeignet beschrieben, um den Valley-Following-Algorithmus darauf anzuwenden. Im Vergleich zur Verarbeitung von Bilddaten werden die so erzielten Ergebnisse als besser positionierte und vollere Kronen beschrieben.

Hyypä und Inkinnen veröffentlichten 1999 einen Artikel zur Segmentierung und Attribuierung von Einzelbäumen [Hyypä, Inkinnen, 1999]. Dieser Artikel wird häufig als Meilenstein der Entwicklung der Einzelbaumsegmentierung angesehen. In einigen Veröffentlichungen, wie zum Beispiel [Næsset, Gobakken, et. al., 2004] wird dieser Ansatz sogar als erster Einzelbaumsegmentierungsansatz gewertet. Hyypä verwendet hier eine modifizierte Version des Wasserscheiden-Algorithmus, bei dem Kanten im Höhenprofil des Oberflächenmodells gesucht werden. Er spezifiziert hier jedoch nicht näher, an welcher Stelle Modifikationen am Algorithmus stattgefunden haben. Auch eine Erkennungsrate wird in dieser Veröffentlichung noch nicht angegeben.

Persson, Holmgren und Söderman verwendeten 2002 bereits für die damalige Zeit ungewöhnlich hoch aufgelöste Laserdaten mit ca. 5 Punkten je Quadratmeter, die bei einer sehr niedrigen Flughöhe von 130m von einem Hub-

schrauber aufgenommen wurden [Persson, Holmgren, Söderman, 2002]. Sie beschreiben ein Verfahren, bei dem die Daten zunächst mit Gaußfiltern mit verschiedenen Radien geglättet werden. Anschließend werden die verschiedenen Glättungsstufen miteinander verglichen. In der gröbsten Stufe werden auch große Bäume nur noch mit einem Maximum dargestellt, während in der feinsten Stufe auch kleinere Bäume mit einem eigenen Maximum erscheinen. Die Maxima der verschiedenen Glättungsstufen werden nun miteinander in Verbindung gebracht. Entspricht genau ein Maximum in den feinen Stufen einem in der groben Stufe, wird hier ein Baum gesetzt. Entsprechen hingegen mehrere Maxima in den feinen Stufen einem in der groben, wird durch Vergleich der Oberfläche des Lasermodells mit einem Baummodell entschieden, welche Glättungsstufe die wahrscheinlichste Hypothese darstellt. Als Baummodell wird hier eine durch eine 3D-Parabel beschriebene Oberfläche genutzt. Die Autoren geben an, dass das Verfahren eine Erkennungsrate von 71 Prozent aufweist.

Pouliot, Bell, King und Pitt beschreiben ebenfalls 2002 ein Verfahren, das Einzelbäume in Plantagen auf hoch aufgelösten Luftbildern (5cm/Pixel) erkennt [Pouliot, King, Bell, Pitt, 2002]. Dabei werden zunächst die lokalen Helligkeits-Maxima bestimmt. Anschließend wird der Helligkeitsverlauf an definierten Strahlen vom Mittelpunkt aus analysiert. Die Werte an den Strahlen werden mit einem Polynom vierten Grades verglichen und die Länge der Strahlen so variiert, dass der Fehler minimiert wird. Dadurch wird gleichzeitig ein Kronendurchmesser ermittelt. In diesem Verfahren werden an vielen Stellen Benutzervorgaben verwendet. So ist zum Beispiel die Größe des initialen Suchfensters, die Anzahl der Strahlen, die anfängliche Länge der Strahlen und der maximale Fehler einstellbar. Die Ergebnisse werden auf Luftbildern von klar strukturierten Plantagen mit visuell sehr gut trennbaren Einzelbäumen betrachtet. Der Algorithmus erzielt dabei eine Erkennungsrate von 80 bis 91 Prozent, abhängig von der verwendeten Bildauflösung. Die besten Ergebnisse wurden jedoch nicht auf den am höchsten aufgelösten Bildern, sondern auf Bildern mit 15cm/Pixel Auflösung erzielt. Die durch die geringere Auflösung erfolgte Glättung hat sich hierbei positiv auf die Erkennungsrate ausgewirkt. Die Autoren vergleichen ihren Algorithmus mit einer Variante, die lokale Maxima in festen Fenstergrößen analysiert (ähnlich dem TREETOPS-Algorithmus). Bei Verwendung fester Fenstergrößen werden abhängig von Bildauflösung und Fenstergröße Erkennungsraten zwischen 40 und 86 Prozent erzielt.

Erikson beschreibt 2003 eine Segmentierung, die auf einer Partikelsimulation basiert [Erikson, 2003]. Nach der Normierung der Bildhelligkeit des Gesamtbildes starten die Partikel dabei an einer Stelle, die potenziell die Spitze eines Baumes sein könnte. Das Verfahren ist dabei so angelegt, dass innerhalb

eines Baumes normalerweise mehrere Ausgangspunkte gefunden werden. Nun wird in jedem Schritt eine Zufallsbewegung des Partikels ausgeführt. Dazu wird zunächst ein temporärer Zielpunkt ermittelt, dessen Lage zum aktuellen Punkt sich für x- und y-Richtung getrennt jeweils über eine Normalverteilung mit festgelegter Varianz ergibt. Von diesem temporären Zielpunkt wird die Helligkeit bestimmt und der Vektor vom aktuellen Punkt zum temporären Zielpunkt damit skaliert. Dieser skalierte Vektor definiert den tatsächlichen Zielpunkt der Bewegung. Mit diesem Vorgehen wird erreicht, dass dunkle Bereiche des Bildes, die potenziell Grenzen zwischen Bäumen darstellen, weniger wahrscheinlich erreicht werden als helle Bereiche. Während der Partikelsimulation werden die Aufenthaltshäufigkeiten der Partikel protokolliert. Das Ergebnis ist ein Bild, das die protokollierten Werte als Graustufen widerspiegelt und das als Grundlage einer Segmentierung dient. In diesem Bild werden über einen Schwellenwert Bereiche mit niedriger Aufenthaltswahrscheinlichkeit ausgeblendet und anschließend zusammenhängende Regionen als Baumkandidaten bestimmt. Zu große Regionen, die dabei auftreten, werden weiter unterteilt, zu kleine verworfen.

In seiner Dissertation [Erikson, 2004] beschreibt der Autor eine Weiterentwicklung des Ansatzes, die die Kronenumrisse besser beschreibt, und gibt ein Segmentierungsergebnis an. Beide Verfahren erkennen 156 der 164 im Luftbild erkennbaren Fichten-Kronen (95,1 Prozent). Insgesamt sind jedoch 202 Bäume im Testbestand vorhanden, sodass sich eine Erkennungsrate von 77,2 Prozent ergibt.

Am Lehrstuhl von Prof. Koch in Freiburg wird im Rahmen des Natscan-Projektes eine Variante des Wasserscheiden-Algorithmus eingesetzt. Diedershagen beschreibt diesen in HALCON implementierten Ansatz in [Diedershagen, Koch, Weinacker, Schütt, 2003]. Dieser Algorithmus segmentiert ein Laserscanner-Modell in einzelne Bereiche, indem Kronen entlang der sie umgebenden Einschnitte zwischen dem jeweiligen Baum und seinen Nachbarn abgegrenzt werden. Im Gegensatz zu einem Valley-Following-Algorithmus wird dabei von den lokalen Maxima ausgegangen und ein Gradienten-Abstieg ausgeführt. Diedershagen führt anschließend noch einige Plausibilitätsprüfungen aus, um zu kleine Regionen mit Nachbarn zu verschmelzen und möglicherweise falsch segmentierte Bäume zu entfernen. Der Autor trifft keine Aussage zur Erkennungsrate.

Straub entwickelt in seiner Dissertation [Straub, 2003] ein Verfahren, um Einzelbäume aus Fernerkundungsdaten zu extrahieren. Er verwendet dabei Bild- und Laserdaten mit einer Auflösung von ca. 4-5 Messpunkten je Quadratmeter. Die initiale Segmentierung erfolgt dabei ebenfalls auf Basis des Wasserscheiden-

Algorithmus. Anschließend werden die Segmente nach den Kriterien „Größe“, „Kreisförmigkeit“, „Konvexität“ und „Vitalität“ bewertet. Der Segmentierungsschritt wird dabei für verschiedene Bildauflösung beziehungsweise verschieden starke Glättungen des Bildes berechnet, um die ideale Auflösungs- oder Glättungsstufe zu finden. Im Mittel erkennt dieser Ansatz ca. 60 Prozent der Bäume, im einzigen genannten Beispiel, das einen Wald zeigt, liegt die Erkennungsrate bei 52 Prozent der Einzelbäume. In diesem Fall hat der Algorithmus jedoch die am besten geeignete Bildauflösung verworfen und ist daher zu einem schlechteren Ergebnis gekommen.

Popescu und Wynne entwickelten 2004 den Ansatz von Gougeon weiter, indem anstelle einer quadratischen Maske ein kreisförmiges Suchfenster zum Einsatz kommt [Popescu, Wynne, 2004]. Sie verwenden für Ihre Untersuchungen Laserdaten mit einer Punktdichte von ca. 1,35 Punkten / m² und Testdaten auf einer Fläche von ca. einem Hektar. Die Autoren berechnen einen erwarteten Kronendurchmesser und skalieren das Suchfenster entsprechend. In der Arbeit sind keine Erkennungsraten genannt.

Die Gruppe um Pitkänen von der Universität Joensuu in Finnland vergleicht in [Pitkänen, Maltamo, et. al., 2004] mehrere Ansätze zur Einzelbaumerkennung. Sie verwenden für ihre Studien ein Oberflächenmodell eines Toposys-1-Scanners mit nominellen 10 Punkten je Quadratmeter. Zunächst betrachten sie lediglich die lokalen Maxima im Lasermodell. Damit werden 49,1 Prozent aller in der Realität vorhandenen Bäume erkannt. Es werden zusätzlich noch ca. 1,3 Mal so viele Bäume erkannt, die jedoch in der Realität nicht vorkommen. Betrachtet man nur die dominanten Bäume im Bestand, erkennt das Verfahren 79,4 Prozent (Tabelle 2.1, RAW). In einem zweiten Schritt wurden die Daten gaußgefiltert und dann die lokalen Maxima extrahiert. Mit diesem Ansatz ließ sich die Anzahl der zusätzlich detektierten Bäume deutlich senken, jedoch wurden auch weniger korrekte Bäume erkannt (Tabelle 2.1, GAUS). Das dritte Verfahren HBF (Height Based Filtering) verwendet Gaußfilter mit verschiedenen Radien und variiert diese abhängig von der Bestandeshöhe. Im ELIM-Verfahren wird aus der Baumhöhe auf den Kronendurchmesser geschlossen. Maxima werden nach verschiedenen Kriterien priorisiert, anschließend werden niedriger priorisierte Maxima innerhalb des Kronendurchmessers eines höher priorisierten Punktes gelöscht (Tabelle 2.1, ELIM). Das letzte Verfahren versucht eine Erkennung von Objekten (Blobs, Binary Large Objects) auf einem in Abhängigkeit des zu erwartenden Kronendurchmessers skalierten Lasermodell (Tabelle 2.1, LAP). Die letzten vier Verfahren weisen jeweils eine Erkennungsrate von ca. 40 Prozent auf. Bezieht man das Ergebnis nur auf die dominanten Bäume, so liegt die Erkennungsrate zwischen 61 und 69 Prozent.

Tabelle 2.1: Ergebnisse der fünf von Pitkänen et. al. untersuchten Verfahren [Pitkänen, Maltamo, et. al. 2004]

Verfahren	Prozentualer Anteil an allen realen Bäumen		
	Erkennungsrate gesamt	Erkennungsrate dominante Bäume	Fälschlich als Baum erkannte Strukturen
RAW	49,2	79,4	64,6
GAUS	36,7	61,4	6,6
HBF	37,0	61,2	5,9
ELIM	41,6	68,7	8,0
LAP	41,5	62,4	16,9

Garcia, Suarez und Pattenaude vergleichen in ihrer Veröffentlichung aus dem Jahre 2007 ebenfalls mehrere Verfahren [Garcia, Suarez, Pattenaude, 2007]. In diesem Fall werden die Verfahren von Gougeon, Popescu und Weinacker verglichen, die in diesem Kapitel bereits erläutert wurden. Sie verwenden dazu Testdaten aus einem Gebiet von 17,5 km² im Gebiet des Loch Lomonds und der Trosachs in Schottland mit einer Punktdichte von ca. 3-4 Punkten/m². Garcia, Suarez und Pattenaude vergleichen die Algorithmen hinsichtlich mehrerer Parameter, wie zum Beispiel Stammzahl, Baumhöhe, Kronendurchmesser und Stammdurchmesser. Für die Anzahl der erkannten Individuen ergibt sich, dass der Algorithmus von Weinacker mit 76 Prozent die meisten Einzelbäume erkannt hat, die mit realen Bäumen in Verbindung gebracht werden konnten. Allerdings hat dieser Algorithmus auch mit 52,8 Prozent die meisten zusätzlichen Bäume zurückgeliefert. Tabelle 2.2 fasst die Ergebnisse für die Anzahl der erkannten Bäume zusammen.

Tabelle 2.2: Untersuchungsergebnisse von Suarez et. al. [Garcia, Suarez, Pattenaude, 2007]

Verfahren	Prozentualer Anteil an allen realen Bäumen	
	Erkennungsrate gesamt	Zusätzlich erkannte Bäume
Gougeon	60,2	17,7
Popescu	71,8	17,5
Weinacker	76,0	52,8

Kwak, Lee, Lee, Biging und Gong verwerfen in [Kwak, Lee, Lee, Biging, Gong, 2007] die Verwendung des Wasserscheiden-Verfahrens, da hier eine Übersegmentierung stattfindet und auch kleinere Bäume, die in Lücken der Hauptschicht erscheinen, segmentiert werden. Die Autoren beziehen sich dabei