

Algorithms and Software for Radio Signal Coverage Prediction in Terrains

A dissertation submitted to the
Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zürich
for the degree of Doctor of Technical Sciences

presented by

Christoph Stamm
Dipl. Informatik-Ingenieur ETH/HTL

born December 17, 1968 in Schleitheim, Switzerland

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Peter Widmayer, Examiner
Prof. Dr. Werner Bächtold, Co-Examiner

Abstract

In this thesis we investigate the components of a radio signal coverage prediction framework based on a geographical information system with virtual reality capabilities (VR-GIS). The framework contains tools for personal communications network definition, analysis, and optimization. It allows the user to explore terrain and simulation data in a virtual reality manner. We focus on both the GIS and telecommunications aspects of our framework.

In contrast to GISs, VR-GISs require improved concepts and techniques such as dynamic scene management and different levels of detail to process huge amounts of terrain data. Terrain data may include terrain surface elevation data, geomorphologic data, and texture data. A data structure for a digital elevation model that supports extraction of triangulated surfaces at an arbitrary level of detail is called a ‘multiresolution triangulation model.’ We present a new triangle refinement rule to create such a multiresolution model based on the ‘longest side bisection’ triangulation. Our refinement rule improves the lower bound of the smallest occurring angle from one half to two thirds of the smallest angle in the initial triangulation. In case of texture data, we present a new image file format, called ‘Progressive Graphics File’ (PGF), which serves efficient storage and very fast progressive loading of different levels of detail. PGF greatly increases coding speeds by allowing a slight degradation in quality; for instance, the decoding of a PGF is six times faster than the decoding of a corresponding JPEG 2000 file.

In the telecommunications part of this thesis we explain in detail new algorithms to efficiently compute the wave propagation prediction of antennas placed on digital terrain models. These algorithms combine well-known empirical wave propagation models with different concepts of visibility. Some of these visibility concepts are frequency-dependent and therefore, computing is more complex. Furthermore, we discuss optimization problems and approximation algorithms related to cost and interference minimization. For instance, we explain a variant of the base station location problem. Since this optimization problem is *NP*-hard, we also discuss implementations and results of some greedy heuristics. In case of quasi-synchronous or simulcast networks, delay-spread is a major interference problem. We present an exact definition of the delay-spread problem and discuss a solution based on Simulated Annealing.

Finally, we present our experimental signal coverage prediction framework. RA₃DIO (Radio Antenna placement with 3D Interactive Optimization) supports exploratory interaction, placement of antennas, computation of essential personal communications network characteristics, and interactive optimization of delay-spread and antenna locations. We discuss the system architecture and explain how the design and development of such a framework is a good deal more than merely combining several system pieces which have been solved optimally.

Kurzfassung

In dieser Dissertation untersuchen wir die einzelnen Komponenten eines Frameworks zur Berechnung und Vorhersage der Signalabdeckung in Mobilfunk-Netzwerken. Das Framework baut auf einem geografischen Informationssystem mit „Virtual-Reality“-Fähigkeiten (VR-GIS) auf. Es enthält Werkzeuge zum Aufbau, zur Analyse und zur Optimierung von Netzwerken und gestattet zudem der Benutzerin die interaktive Erkundung des Geländes. Wir präsentieren sowohl Aspekte geografischer Informationssysteme (GIS), als auch der Telekommunikation.

Im Gegensatz zu konventionellen GIS benötigen VR-GIS verbesserte Konzepte und Techniken zur interaktiven Handhabung grosser Mengen von Geländedaten. Dabei spielen verschiedene Auflösungsstufen und dynamisches Szenenmanagement eine wichtige Rolle. Unter Geländedaten verstehen wir nicht nur digitale Geländemodelle, sondern auch geomorphologische Daten und diverse Arten von Texturen. Die Datenstruktur, welche die adaptive Triangulation eines digitalen Geländemodells gemäss einer beliebigen Auflösung unterstützt, bezeichnet man als „Multiresolution“-Triangulationsmodell. Wir zeigen ein neues Verfeinerungsverfahren zur Erzeugung eines solchen Triangulationsmodells, welches auf der Halbierung einer längsten Seite eines Dreiecks basiert. Es verbessert die untere Schranke für den kleinsten Winkel in einer Triangulation von einem Zweitel auf zwei Drittel des ursprünglich kleinsten Winkels. Für Texturen präsentieren wir ein neues Bilddateiformat, genannt „Progressive Graphics File“ (PGF), um verschiedene Auflösungsstufen effizient abzuspeichern und schnell und progressiv zu laden. PGF nimmt kleine Qualitätseinbussen in Kauf, um die Geschwindigkeit der Codierung zu erhöhen; die Decodierung eines PGF-Bildes ist etwa sechsmal schneller als die Decodierung eines entsprechenden „JPEG 2000“-Bildes.

Im Telekommunikationsteil dieser Dissertation stellen wir neue Algorithmen zur effizienten Berechnung der elektromagnetischen Wellenausbreitung in einem digitalen Geländemodell vor. Diese Algorithmen verknüpfen bekannte empirische Ausbreitungsmodelle mit verschiedenen Sichtbarkeitskonzepten. Einige dieser Sichtbarkeitskonzepte sind frequenzabhängig und somit schwieriger zu berechnen. Des weitern diskutieren wir Optimierungsprobleme und Approximationsalgorithmen zur Minimierung der Kosten und Interferenzen in einem Netzwerk. Eines dieser Optimierungsprobleme ist eine Variante des Antennenplatzierungsproblems. Da dieses Problem *NP*-schwer ist, präsentieren wir Implementierungen und Resultate von möglichen Greedy-Heuristiken. In quasi-synchronen Netzwerken kann ein spezielles Interferenzproblem auftauchen. Wir definieren dieses „Delay-Spread“-Problem und diskutieren verschiedene Lösungsansätze und einen Algorithmus basierend auf „Simulated Annealing“.

Im letzten Teil der Dissertation präsentieren wir unsern Prototypen des Frameworks. RA₃DIO (Radio Antenna placement with 3D Interactive Optimization) ermöglicht interaktiv das Gelände zu erkunden, Antennen zu platzieren, Ausbreitungscharak-

teristiken zu berechnen und Antennenpositionen und Interferenzen zu minimieren. Wir diskutieren die Systemarchitektur und führen aus, dass der Entwurf und die Entwicklung eines solchen Frameworks weit mehr ist, als die Zusammenführung einzelner optimal gelöster Komponenten.