

Automatische Erfassung von Gebäudemodellen aus Laserscannerdaten und die Integration von Luftbildern

FRANZ ROTTENSTEINER, Sydney & CHRISTIAN BRIESE, Wien

Keywords: 3D building models, building extraction, data acquisition, LIDAR processing, multi-sensor processing.

Zusammenfassung: Es wird eine Methode zur automatischen Erzeugung dreidimensionaler Gebäudemodelle aus Laserscannerdaten vorgestellt. Nach der Gebäudedetektion werden in einem digitalen Oberflächenmodell ebene Dachflächen extrahiert, aus denen durch Gruppierung Polyedermodelle entstehen. Das Modell wird durch hybride Ausgleichung, gegebenenfalls unter Berücksichtigung geometrischer Bedingungen, verbessert. Es werden Möglichkeiten zur Integration von Luftbildern in den Prozess der Auswertung diskutiert. Die hier präsentierten Ergebnisse stammen von einem Testgebiet der Stadt Wien.

Summary: *Automatic generation of building models from LIDAR data and the integration of aerial images.* We present a method for the automated generation of 3D building models from LIDAR data. First, building regions are detected automatically. After that, roof planes are detected in a digital canopy model. These roof planes are grouped in order to create polyhedral building models. The model is improved by an overall adjustment considering geometric constraints where appropriate. The issue of integrating aerial images into the reconstruction process is discussed. Intermediate results are presented for a test site in the City of Vienna.

1 Einleitung

1.1 Motivation und Zielsetzung

Mit flugzeuggetragenen Laserscannern können heute Punktwolken erfasst werden, die dicht genug sind, um die automatische Ableitung von dreidimensionalen Gebäudemodellen möglich zu machen. Dabei beschränkt sich die Automation nicht auf die Detektion von Gebäuden und deren Ränder, sondern man kann Modelle erzeugen, welche die Dachstruktur korrekt wiedergeben. Zu diesem Zweck werden oft bestehende Gebäudegrundrisse verwendet (BRENNER 2000, VOSSELMAN & DIJKMAN 2001), oder es kommen Algorithmen zur Anwendung, die auf gewissen Annahmen, z. B. der Rechtwinkeligkeit, aufbauen (VOSSELMAN 1999).

In dieser Arbeit soll eine Methode zur automatischen Ableitung von polyedrischen

Gebäudemodellen aus Laserscannerdaten vorgestellt werden, die ohne Grundrisse und ohne Annahmen über geometrische Bedingungen auskommt. In einem aus den Laserscannerdaten abgeleiteten digitalen Oberflächenmodell (DOM) werden ebene Dachflächen gesucht. Die Randpolygone dieser Dachflächen werden durch Verschneidung benachbarter Ebenen bzw. durch Detektion von Höhensprüngen verbessert. Anschließend werden die Gebäudeparameter durch hybride Ausgleichung in konsistenter Weise geschätzt. Möglichkeiten zur Integration von digitalen Luftbildern zur Verbesserung der Qualität der Gebäudemodelle werden ebenfalls diskutiert. Die hier präsentierten Ergebnisse stammen von einem Datensatz, der von TopoSys für die Gemeinde Wien erfasst wurde (Abb. 1a). Obwohl das vorzustellende Verfahren noch nicht vollständig

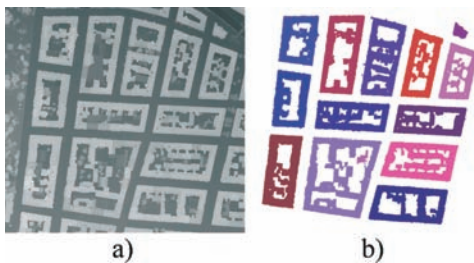


Abb. 1: Gebäudedetektion in der Stadt Wien. a) DOM (Rasterweite: 0.5 m, Ausdehnung: 410 m × 435 m); b) Gebäuderegionen.

implementiert wurde, zeigen diese bisherigen Ergebnisse doch sein Potenzial auf.

1.2 Bestehende Lösungsansätze

Die automatische Gebäudeextraktion beginnt mit der Detektion der Gebäude (ROTTENSTEINER & BRIESE 2002; Abb. 1). Anschließend werden die Gebäude geometrisch rekonstruiert. Dazu können in der Literatur zwei Strategien unterschieden werden. Einerseits kann das Interessensgebiet in rechteckige Regionen aufgeteilt werden, in denen man parametrische Primitive in die Daten einpasst (BRENNER 2000, VOSSELMAN & DIJKMAN 2001). Andererseits können ebene Dachflächen durch eine Segmentierung des DOM gefunden werden (BRENNER 2000), aus denen durch Gruppierung polyedrische Gebäudemodelle erzeugt werden. Auch in diesem Kontext werden oft Grundrissdaten verwendet (BRENNER 2000, VOSSELMAN & DIJKMAN 2001). VOSSELMAN (1999) beschreibt eine Methode zur geometrischen Rekonstruktion von Gebäuden nur aus Laserscannerdaten, wobei er aber nicht ohne Annahmen bezüglich der Orthogonalität der Wände auskommt.

Die Ergebnisse der Gebäudeextraktion können durch Kombination von Laserscannerdaten und Luftbildern verbessert werden (SCHENK & CSATHO 2002). AMERI (2000) erzeugt ebene Segmente durch Projektion der Ergebnisse einer Segmentierung im Bildraum auf ein DOM und verbessert die Genauigkeit der so erhaltenen Modelle durch Zuordnung von Gebäudekanten zu Grau-

wertkanten aus mehreren Bildern. Ein ähnliches Verfahren wurde von ROTTENSTEINER (2001) für die automatische Feinmessung von parametrischen Gebäudeprimitiven angewandt.

1.3 Systemübersicht und Arbeitsablauf

In dieser Arbeit wird nur die geometrische Rekonstruktion von Gebäuden behandelt. Außer für die Parameterschätzung wird das DOM durch ein Rastermodell repräsentiert, das aus den Laserscannerpunkten durch lineare Prädiktion mit einer Geraden als Kernfunktion abgeleitet wird (ROTTENSTEINER & BRIESE 2002). Der Abstand der Laserscannerpunkte betrug 0.1 m in bzw. 0.9 m quer zur Flugrichtung. Daraus wurde ein DOM mit einer Rasterweite von 0.5 m abgeleitet. Der Arbeitsablauf für die Gebäuderekonstruktion besteht aus vier Schritten:

1. *Detektion von Dachflächen* auf Basis einer Analyse der lokalen Variationen der Normalvektoren des DOM (Abschnitt 2).
2. *Gruppierung der Dachflächen und Modell-erzeugung*: Eine Klassifizierung der Stellung benachbarter Flächen zu einander im Raum liefert Information über Komplanarität, Schnittlinien und Höhensprünge. Es entsteht ein Modell der Dachlandschaft, das durch Wände und Boden vervollständigt wird (Abschnitt 3).
3. *Konsistente Schätzung der Modellparameter*: Die geometrischen Parameter der eben gewonnenen Polyedermodelle werden durch eine hybride Ausgleichung geschätzt.
4. *Modellregularisierung*: Hypothesen über geometrische Bedingungen zwischen Ebenen des Gebäudemodells werden erzeugt und in einer weiteren Ausgleichung berücksichtigt. Unser Ausgleichungsmodell wird in Abschnitt 4 vorgestellt.

Der Detaillierungsgrad der Gebäudemodelle und die Lokalisierungsgenauigkeit der Höhensprünge sind durch die Auflösung der Laserscannerdaten limitiert. In Abschnitt 5 werden Ansätze diskutiert, wie diese Einschränkungen mit Hilfe von vergleichsweise

höheraufgelösten Luftbildern überwunden werden können.

2 Detektion von Dachflächen

FUCHS (1998) beschreibt eine Methode zur polymorphen Merkmalsextraktion, die auf eine Klassifikation der Textur eines digitalen Bildes als „homogen“, „linear“ oder „punktartig“ abzielt. Diese Klassifizierung kann auf einen statistischen Test des Quadrates des mittleren Grauwertgradienten in einer Umgebung eines Bildelementes zurückgeführt werden, wobei sich der Schwellwert für die Klassifizierung aus dem Signifikanzniveau des Tests ergibt. Wird diese Methode auf ein zweikanaliges Bild angewandt, dessen Kanäle die ersten Ableitungen des DOM nach X bzw. Y sind, können „homogene“ Pixel als in einem lokal ebenen Gebiet liegend interpretiert werden (Abb. 2a und 2b).

Die Detektion von Dachflächen erfolgt durch ein iteratives Verfahren. Zunächst wird die Texturklassifizierung mit einem sehr strengen Schwellwert (mit einem sehr hohen Signifikanzniveau) durchgeführt. Dadurch wird ein großer Prozentsatz fälschlicherweise als inhomogen klassifizierter Pixel und nur ein kleiner Prozentsatz irrtümlich als homogen klassifizierter Pixel zugelassen, sodass nur jene Gebiete als homogen klassifiziert werden, deren Planarität hoch signifikant ist. (Abb. 2a). Zusammenhän-

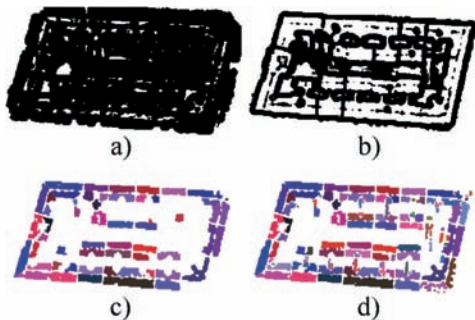


Abb. 2: Detektion von Dachflächen. a) und b) „homogene“ Pixel (weiß) für zwei Signifikanzniveaus; c) Ebenensegmente aus a) nach dem Bereichswachstum; d) endgültige Dachflächen-segmente.

gende Gebiete von homogenen Pixeln werden dann als Saatregionen für ein Bereichswachstumsverfahren ausgewählt, wenn die Ebenenausgleichung einen kleinen mittleren Gewichtseinheitsfehler ergibt. Neue Pixel in der Nachbarschaft eines Ebenensegmentes werden diesem zugeordnet, wenn der Abstand des 3D Punktes von der Ebene unter einem Schwellwert liegt. Dies wird so lange wiederholt, bis kein weiteres Pixel einem Ebenensegment zugeordnet werden kann. Abb. 2c zeigt das Ergebnis des Wachstums der Saatregionen aus Abb. 2a: Etwa die Hälfte der Pixel innerhalb des Gebäudes konnten bereits einem Ebenensegment zugeordnet werden. Nun wird die Klassifizierung der Textur mit einem größeren Schwellwert wiederholt, wodurch ein größerer Prozentsatz an fälschlich als homogen klassifizierten Pixeln zugelassen wird. Homogene Gebiete, die noch keinem Ebenensegment zugeordnet wurden, werden der eben beschriebenen Prozedur aus Selektion von Saatregionen und Bereichswachstum zugeführt, wodurch neue Ebenensegmente gefunden werden. Auf diese Weise werden mehrere Iterationen durchgeführt. Abb. 2d zeigt die so gefundenen Ebenensegmente. Es wurden 64 % der Pixel innerhalb der Gebäuderegion einem dieser Ebenensegmente zugeordnet. Der mittlere Gewichtseinheitsfehler der Ebenenausgleichung lag für alle Ebenen unter ± 15 cm.

Abb. 3a zeigt jene Pixel aus Abb. 2, die noch keinem Ebenensegment zugeordnet wurden. Die meisten dieser unklassifizierten Pixel findet man an den Rändern der Ebenensegmente, aber einige gehören entweder zu kleinen Dachstrukturen, die noch nicht extrahiert werden konnten, zu Strukturen auf den Dächern, die nicht eben sind (z. B. Dachgärten), oder zu Objekten, die gar kein Teil des Gebäudes sind (z. B. Bäume). Wir versuchen, zusätzliche Ebenensegmente in den unklassifizierten Gebieten zu finden und nicht zu den Gebäuden gehörende Objekte zu eliminieren. Zunächst suchen wir nach zusammenhängenden Gebieten von Pixeln mit einem kleinen Höhengradienten, um kleinere horizontale Ebenensegmente zu finden. Indem wir beim Bereichswachstum

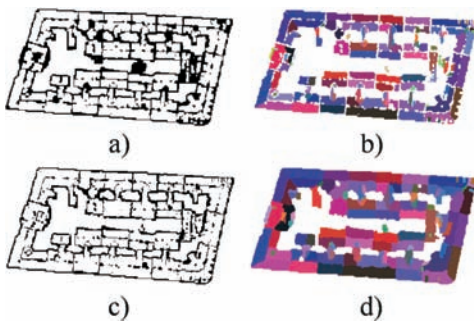


Abb. 3: Nachbearbeitung der Segmentierung aus Abb. 2. a) Unklassifizierte Pixel; b) Ergebnis der Nachbearbeitung; c) Pixel, die keiner Ebene zugeordnet wurden; d) Voronoi-Diagramm nach der Vereinigung komplanarer Segmente.

größere Residuen zulassen, erhalten wir Segmente, die aus mehreren kleinen Ebenen bestehende Gebäudeteile generalisieren, eine Folge der beschränkten Auflösung der Laserscannerdaten. Schließlich eliminieren wir zusammenhängende Gebiete noch nicht klassifizierter Pixel, wenn sie einen großen Prozentsatz an „punktartigen“ Pixeln aufweisen, was ein Indikator für das Vorhandensein von Bäumen ist (ROTTENSTEINER & BRIESE 2002). Abb. 3b zeigt die endgültigen Dachflächen als Label-Bild, Abb. 3c die unklassifizierten Pixel nach der Eliminierung der verbleibenden Bäume. 69.9% aller Pixel in Gebäuderegionen werden einem Ebenensegment zugeordnet. 92.1% dieser Pixel (oder 64.4% aller Gebäudepixel) liegen in einem Segment mit einem mittleren Gewichtseinheitsfehler der Ebenenausgleichung unter ± 15 cm. Die verbleibenden 7.9% liegen in generalisierenden Segmenten.

3 Gruppierung der Dachflächen und Erzeugung der Randpolygone

Die Nachbarschaftsbeziehungen der ebenen Segmente werden aus einem Voronoi-Diagramm dieser Segmente abgeleitet (AMERI 2000): jedes unklassifizierte Pixel innerhalb des Gebäudes wird dem geometrisch nächstliegenden zugeordnet. Benachbarte komplanare Segmente werden vereinigt, wobei die Komplanarität mit einem Fisher-Test zum

Vergleich der mittleren Gewichtseinheitsfehler der Ebenenausgleichung unter Verwendung zweier Modelle (zwei Ebenen bzw. eine Ebene) getestet wird (Abb. 3d).

Die Nachbarschaftsbeziehungen der restlichen Dachflächen müssen weiter untersucht werden, um die Dachränder zu finden. Als erste Näherung für die Randpolygone dienen die Begrenzungen der Regionen im Voronoi-Diagramm (Abb. 4a). Jeder Abschnitt dieser Polygone, der zwei Dachflächen trennt, muss entsprechend der geometrischen Konfiguration dieser Flächen klassifiziert werden: sie können einander schneiden, es kann ein Höhengsprung auftreten, oder es liegen sowohl eine Verschneidung als auch ein Höhengsprung vor.

Für diese Klassifizierung müssen die Schnittlinien aller benachbarten Ebenensegmente berechnet werden. Es werden für jedes Ebenenpaar Abschnitte der ursprünglichen Kette von Kantenpixeln zwischen den Ebenen gesucht, deren mittlere quadratische Abweichung von der Schnittlinie unter einem Schwellwert liegt, die also zur Schnittgeraden passen. Wenn die gesamte Kantenpixelkette dieses Kriterium erfüllt, so stellt die Schnittgerade die tatsächliche Grenze zwischen den beiden Ebenen dar, und die ursprüngliche Kantenpixelkette ist durch ein Segment der Schnittgerade zu ersetzen. Ist dies nur für einen Teil der Kantenpixelkette der Fall, wird diese in mehrere Teile aufgespalten, wobei jeder Teil in der Folge individuell gehandhabt wird. Auch für jene Teile, die zur Schnittgeraden passen, wird die Kantenpixelkette durch ein Segment der Schnittgerade ersetzt. Für Kantenpixelketten oder deren Teile, die nicht zur Schnittgeraden passen, wird ein Höhengsprung angenommen. Um diesen zu lokalisieren, wird das relative Maximum der Komponente des Gradienten des DOM orthogonal zur Kantenpixelkette gesucht, wodurch man eine verbesserte Kantenpixelkette erhält. Kann diese durch eine Gerade approximiert werden, wird sie durch ein Geradensegment ersetzt, ansonsten wird sie durch ein Polygon approximiert. In der aktuellen Implementierung werden keine weiteren Versuche unternommen, dieses Polygon, das auf Grund

von Ausreißern sehr unregelmäßig sein kann, zu regularisieren.

Sobald alle Abschnitte der ursprünglichen Kantenpixelketten entweder durch Segmente von Schnittgeraden oder durch Polygone an Höhengsprüngen ersetzt worden sind, werden die endgültigen Randpolygone der Dachflächen aus diesen Stücken zusammengesetzt. Wir berechnen alle Schnittpunkte benachbarter Geradenstücke oder Polygonsegmente. Liegt ein solcher Schnittpunkt in der Nähe der ursprünglichen Endpunkte dieser Segmente, wird er als Ecke des Randpolygons akzeptiert. Andernfalls werden die beiden ursprünglichen Ecken durch ein weiteres Geradenstück verbunden.

Nun können die Polyedermodelle erzeugt werden. Die Ecken der Randpolygone werden zu Ecken des Gebäudemodells, die Kanten der Randpolygone zu Gebäudekanten. Für jedes Polygonsegment eines Höhengsprunges muss eine vertikale Fläche, einer Wand entsprechend, in das Modell eingefügt werden.

Die Module zur Gruppierung und zur Modellgenerierung sind noch in der Implementierungsphase. Abb. 4b zeigt ein vorläufiges Ergebnis der Detektion von Schnittlinien und Höhengsprüngen. Letztere müssen in der Zukunft entweder durch die Elimination von Ausreißern oder durch neue Methoden der Ausdünnung verbessert werden. Da sich bei der Approximation der Dachpolygone durch Schnittgeraden und die Lage der Grenzen zwischen benachbarten Flächen ändert, können sich auch die Nachbarschaftsbeziehungen selbst ändern. Es wäre daher wünschenswert, auch die Untersu-



Abb. 4: Ausschnitt des DOM für das Gebäude aus Abb. 2 mit überlagerten Dachpolygonen. a) Die ursprünglichen Pixelketten aus Abb. 3d; b) nach der Detektion von Verschneidungen und Höhengsprüngen.

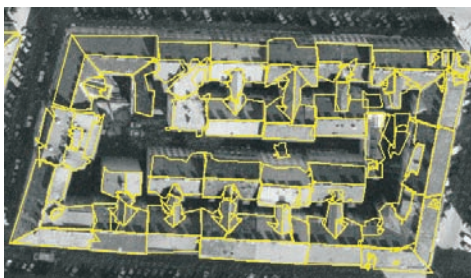


Abb. 5: Luftbild des Gebäudes in Abb. 2 mit Dachkanten. Pixelgröße am Boden: 15 cm.

chung der Nachbarschaftsbeziehungen und damit die Erzeugung der Randpolygone der Dachflächen in iterativer Weise durchzuführen.

Abb. 5 zeigt ein Luftbild im Maßstab 1:7000 mit überlagerten Dachpolygonen. Die Dachstruktur wird vom Modell gut wiedergegeben. Kleinere Details wie z. B. Rauchfänge konnten bei der gegebenen Auflösung der Laserscannerdaten nicht rekonstruiert werden. Jene Kanten, die Höhengsprüngen entsprechen, sind von den entsprechenden Kanten im Bild ca. 5 Pixel entfernt, was etwa der ein- bis eineinhalbfachen Rasterweite des DOM entspricht. Das etwas unruhige Aussehen einiger Polygonabschnitte wird durch unerkannte Ausreißer in der Lokalisierung von Höhengsprüngen verursacht. Abb. 6 zeigt eine Visualisierung eines 3D Modells, das aus vertikalen Prismen besteht, die durch die Randpolygone der Dachflächen definiert und durch den Bo-

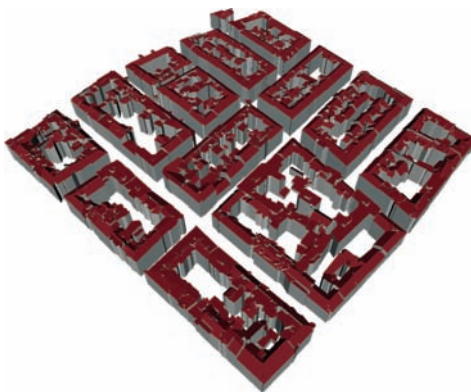


Abb. 6: VRML-Visualisierung von vertikalen Prismen durch die Dachpolygone.

den bzw. die jeweilige Dachfläche begrenzt werden. Die Dachstruktur wird im Modell korrekt wiedergeben.

4 Schätzung der Gebäudeparameter

Bisher wurden die Parameter der Ebenen des Gebäudemodells unabhängig voneinander bestimmt. Die Gebäudeecken wurden durch Verschneidung benachbarter Flächen oder durch die Lokalisierung von Höhengsprüngen berechnet. Eine Gesamtausgleichung unter Verwendung aller vorhandenen Daten ist wichtig, um geometrisch konsistente Gebäudemodelle zu erhalten und um geometrische Bedingungen berücksichtigen zu können. Für diese hybride Ausgleichung verwenden wir das Programm ORIENT (KAGER 1989).

Unser Ausgleichungsmodell beruht auf der Abbildung der Randdarstellung eines Gebäudes auf ein System von GESTALT-Beobachtungen, welches das Gebäudemodell und die ihm inhärenten Bedingungen in der Ausgleichung repräsentiert. Unter einer GESTALT-Beobachtung verstehen wir dabei Beobachtungen der Art, dass sich ein Punkt P auf einer Polynomfläche befindet. Die Parametrisierung dieser Fläche erfolgt in einem Beobachtungskoordinatensystem (u, v, w) , das mit dem Objektkoordinatensystem über eine Verschiebung P_0 und drei Drehungen $\Theta = (\omega, \varphi, \kappa)^T$ zusammenhängt. Die eigentliche Beobachtung ist eine fiktive Beobachtung der größten Komponente des Differenzvektors zwischen der Fläche und P mit dem Wert 0. Es sei $p_R = (u_R, v_R, w_R)^T = R^T(\Theta) \cdot (P - P_0)$, mit einer mit Θ parametrisierten transponierten Drehmatrix $R^T(\Theta)$. Unter Beschränkung auf vertikale Ebenen für Wände und allgemeine Ebenen für Dächer können GESTALT-Beobachtungsgleichungen auf drei Arten formuliert werden:

$$\begin{aligned} r_u &= m_u \cdot u_R + a_{00} + a_{01} \cdot (m_v \cdot v_R) \\ r_v &= m_v \cdot v_R + b_{00} + b_{10} \cdot (m_u \cdot u_R) \\ r_w &= m_w \cdot w_R + c_{00} + c_{10} \cdot (m_u \cdot u_R) \\ &\quad + c_{01} \cdot (m_v \cdot v_R) \end{aligned} \quad (1)$$

In Gleichung 1 bezeichnet r_i die Verbesserung der fiktiven Beobachtung der Koordinate i , und die $m_i \in \{-1, 1\}$ stellen die Spiegelungskoeffizienten dar. Eine Applikation kann frei darüber entscheiden, welche Parameter (P, P_0, Θ , Flächenparameter a_{jk}, b_{ik}, c_{ij}) in der Ausgleichung bestimmt werden sollen und wie eine Fläche zu parametrisieren ist. Weiters können sich mehrere GESTALTen auf die selben Transformations- und/oder Flächenparameter beziehen, was zur Modellierung geometrischer Bedingungen verwendet werden kann. Für die Gebäudeextraktion werden die Drehwinkel gleich 0 gesetzt und konstant gehalten. P_0 liegt im Inneren des Gebäudes und ist ebenfalls konstant. Für jede Fläche der Randdarstellung des Gebäudes wird ein Satz von GESTALT-Beobachtungen definiert, wobei für Wände eine der ersten beiden Gleichungen 1 und für Dächer die dritte gewählt werden. Die Unbekannten der Ausgleichung sind die Objektkoordinaten der Gebäudeecken P und die Ebenenparameter (a_{jk}, b_{ik}, c_{ij}). Da jede Gebäudeecke in mindestens drei Flächen enthalten ist, können ihre Objektkoordinaten immer aus den entsprechenden GESTALT-Beobachtungen bestimmt werden. Zur Bestimmung der Ebenenparameter müssen die Sensordaten herangezogen werden. *Laserscannerpunkte* werden den Dachflächen zugeordnet. Jeder Laserpunkt liefert eine GESTALT-Beobachtung und drei direkte Beobachtungen für die Objektkoordinaten des Punktes, führt aber auch zu drei unbekanntem Objektkoordinaten für P . *Direkte Beobachtungen* für die Koordinaten der Gebäudeecken an Höhengsprüngen machen die Parameter der Wände bestimmbar.

Das so entstehende Ausgleichungssystem ist hochredundant, sodass falsche Beobachtungen durch robuste Schätzung eliminiert werden können (KAGER 1989). Der wichtigste Parameter des stochastischen Modells ist die Standardabweichung a priori der GESTALT-Beobachtungen, durch die die „Starrheit“ des Gebäudemodells modelliert wird. Sie wird im Bereich von wenigen Zentimetern gewählt.

4.1 Regularisierung der Polyedermodelle

Zukünftig sollen in der Ausgleichung geometrische Bedingungen berücksichtigt werden, wenn sich genügend Hinweise für ihr Vorhandensein finden. Erfüllen zwei Flächen ε_1 und ε_2 eine solche Bedingung, werden zusätzliche GESTALT-Beobachtungen in die Ausgleichung eingeführt, wobei diese Bedingungen durch spezifische Parametrisierung der Ebenen und geeignete Definition des Beobachtungskordinatensystems modelliert werden. Abb. 7 zeigt drei mögliche Bedingungen. In allen Fällen fällt eine Achse des Beobachtungskordinatensystems mit der Schnittkante der beiden Ebenen zusammen, und einer der Endpunkte der Schnittkante fungiert als Referenzpunkt P_0 . Die Drehwinkel ω und φ sind gleich 0 und konstant, für κ gibt es eine zusätzliche Unbekannte. Für jede Gebäudecke v_i in einer der Flächen werden GESTALT-Beobachtungen für ε_1 und/oder ε_2 eingeführt. Die beiden Ebenen werden wie folgt parametrisiert:

- Horizontale Firstlinie: $\varepsilon_1: r_w = w_R + c_{01}^1 \cdot v_R$ und $\varepsilon_2: r_w = w_R - c_{01}^1 \cdot v_R$. Es gibt nur eine unbekannte Dachneigung c_{01}^1 . Symmetrie wird durch die Wahl von $m_v = -1$ für ε_2 erzwingen.
- Orthogonale Wände: $\varepsilon_1: r_u = u_R, \varepsilon_2: r_v = v_R$. Es gibt keine zusätzlichen Flächenparameter.
- Horizontale Traufenlinie: $\varepsilon_1: r_w = w_R + c_{01}^1 \cdot v_R$ und $\varepsilon_2: r_v = v_R$. Es gibt eine zusätzliche Dachneigung c_{01}^1 .

Das stochastische Modell der GESTALT-Beobachtungen zur Modellierung geometrischer Bedingungen wird durch ihre a priori

Standardabweichung beschrieben. Nach der Erzeugung der zusätzlichen Beobachtungen muss die Ausgleichung natürlich wiederholt werden.

5 Integration von Luftbildern

Größere Dachflächen können sehr gut aus den Laserscannerdaten abgeleitet werden, aber die Qualität dieser Ergebnisse wird durch die Auflösung dieser Daten beschränkt. Da die Auflösung von Luftbildern nach wie vor wesentlich besser als die von Laserscannern ist, sollen Luftbilder im Auswerteprozess berücksichtigt werden können. Dies kann in zwei Phasen erfolgen: Sie können helfen, zusätzliche Dachflächen zu finden, und sie können verwendet werden, um die geometrische Qualität der Position der Dachkanten durch Zuordnung von Modell- zu Bildkanten zu verbessern.

5.1 Detektion von Ebenensegmenten

In Abschnitt 2 wurde beschrieben, dass wir Ebenensegmente akzeptieren, durch die aus kleineren Ebenen bestehende Dachstrukturen generalisiert werden. Es gibt auch Regionen, in denen keine Ebenen gefunden werden konnten. In beiden Fällen kann die Segmentierung unter Verwendung von Luftbildern verbessert werden.

Abb. 8 zeigt eines der „unklassifizierten“ Gebiete aus Abb. 3a sowie den entsprechenden Ausschnitt aus einem Luftbild und das Ergebnis einer Segmentierung dieses Bildes. Im DOM ist dieses Gebiet nur ca. 5 Pixel breit. Es ist nicht möglich, die beiden Dachflächen des Verbindungstrakts zu trennen, weil die Größe der detektierbaren Flächen

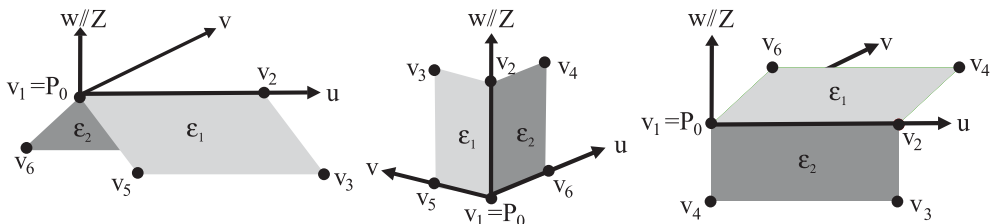


Abb. 7: Drei Beispiele für geometrische Bedingungen zwischen zwei Ebenensegmenten ε_1 und ε_2 . Links: horizontale Firstlinie. Mitte: zwei orthogonale Wände. Rechts: horizontale Traufenlinie.

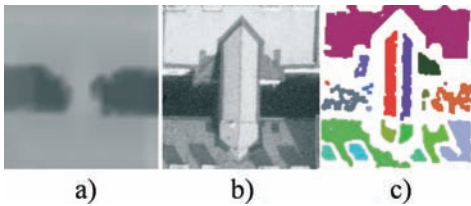


Abb. 8: a) Das DOM in einem der „unklassifizierten“ Gebiete aus Abb. 3a; b) Luftbild dieses Gebietes; c) Ergebnis einer Grauwertsegmentierung des Luftbildes.

durch die Größe der bei der Segmentierung verwendeten Filter beschränkt ist. Im Luftbild können die beiden Flächen aber sehr wohl getrennt werden. Abb. 8 zeigt, dass es sinnvoll ist, die Ergebnisse einer Grauwertsegmentierung der digitalen Bilder in Gebieten zu verwenden, in denen die Segmentierung des DOM aus Laserscannerdaten versagt. Die Ergebnisse der Segmentierung im Bildraum müssen auf das DOM projiziert werden, wodurch man eine erste Näherung für die Ebenenparameter bekommt. Außerdem ist es denkbar, homologe Segmente aus mehreren Bildern einander zuzuordnen. In der Zukunft werden wir die signifikantesten Segmente, die auf diese Weise gefunden werden (jene, die in mehreren Bildern gefunden werden) für die Modellbildung verwenden. Sie können entweder direkt in die Liste der Ebenensegmente hinzugefügt werden, oder sie können als neue Saatregionen für das Bereichswachstum in kritischen Gebieten angewandt werden.

5.2 Einpassung des Drahtgittermodells

Anders als in Laserscannerdaten, können die Gebäudeumrandungen in digitalen Luftbildern unter Voraussetzung eines guten Kontrastes sehr gut extrahiert werden. Die Drahtgittereinpassung basiert darauf, dass das aus Laserscannerdaten erzeugte Polyedermodell in die Luftbilder projiziert wird (Abb. 5), wodurch man in jedem Bild für jede Objektkante ein Interessensgebiet erhält, in dem Grauwertkanten, die ungefähr parallel zur Projektion der Objektkante verlaufen, als Kandidaten für eine Zuordnung zur

jeweiligen Objektkante gesucht werden. Diese Grauwertkanten werden in der Schätzung der Modellparameter durch eine Erweiterung des in Abschnitt 4 beschriebenen Modells der hybriden Ausgleichung berücksichtigt: Zusätzlich zu den dort beschriebenen Beobachtungen werden noch die Endpunkte von Bildkantensegmenten den Dachkanten des Modells zugeordnet, so dass man für jeden Endpunkt zwei Bildkoordinaten und zwei GESTALT-Beobachtungen (eine pro der Kante benachbarten Fläche) erhält. Zusätzlich gibt es drei unbekannte Objektkoordinaten.

Während die Suche nach Zuordnungskandidaten für alle Dachkanten und alle Bilder unabhängig erfolgt, erfolgt die Parameterschätzung in einer Gesamtausgleichung unter Verwendung der GESTALT-Beobachtungen, der Bildkoordinaten der Bildkantenendpunkte, der Laserscannerpunkte und der direkten Beobachtungen für die Punkte an den Höhengsprüngen. Robuste Schätzung wird zur Eliminierung falscher Zuordnungen herangezogen. Dieses Verfahren wurde zur automatischen Feinmessung von Gebäudeprimitiven in einem System für die halbautomatische Gebäudeextraktion entwickelt. In einem Test (Bildmaßstab 1:4500, sechsfache Überdeckung) konnten damit Genauigkeiten im Bereich von wenigen Zentimetern erreicht werden (ROTTENSTEINER 2001).

7 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde ein Verfahren zur automatischen Ableitung von Gebäudemodellen aus hochauflösenden Laserscannerdaten vorgestellt. Vorläufige Ergebnisse aus dem Projektgebiet der Stadt Wien haben das Potenzial dieser Methode veranschaulicht. Es wurde auch die Thematik der Integration von digitalen Luftbildern in den automatischen Auswerteprozess diskutiert. Mit Hilfe einer solchen „Multisensorgrammetrie“ hoffen wir, noch bessere Resultate erzielen zu können. In der Zukunft sollen nicht nur die fehlenden Module der Methode implementiert, sondern auch Qualitätsparameter für die Ergebnisse dieser Methode abgeleitet werden.

Danksagung

Diese Arbeit wurde vom österreichischen Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung im Rahmen des Forschungsprojektes P15789 und vom Australian Research Council im Rahmen des Discovery Project DP0344678 unterstützt.

Literatur

- AMERI, B., 2000: Automatic Recognition and 3D Reconstruction of Buildings from Digital Imagery. – Dissertation, Univ. Stuttgart, DGK – C 526.
- BRENNER, C., 2000: Dreidimensionale Gebäude-rekonstruktion aus digitalen Oberflächenmodellen und Grundrissen. – Dissertation, Univ. Stuttgart, DGK – C 530.
- FUCHS, C., 1998: Extraktion polymorpher Bildstrukturen und ihre topologische und geometrische Gruppierung. – Dissertation, Univ. Bonn, DGK-C 502, München.
- KAGER, H., 1989: ORIENT: A Universal Photogrammetric Adjustment System. – In: GRÜN, A. & KAHMEN, H. (Hrsg.): Optical 3-D Measurement. – pp. 447–455, Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe.
- ROTTENSTEINER, F., 2001: Halbautomatische Gebäudeauswertung durch Integration von hybrider Ausgleichung und 3D Objektmodellierung. – PFG 2001 (4): 289–301.
- ROTTENSTEINER, F. & BRIESE, C., 2002: A new Method for Building Extraction in Urban Areas from High-Resolution LIDAR Data. – International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, and SIS 34 (3A): 295–301.
- SCHENK, T. & CSATHO, B., 2002: Fusion of LIDAR Data and Aerial Imagery for a more Complete Surface Description. – International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, and SIS 34 (3A): 310–317.
- VOSSELMAN, G., 1999: Building Reconstruction Using Planar Faces in Very High Density Height Data. – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 32 (3-5W2): 87–92.
- VOSSELMAN, G. & DIJKMAN, S., 2001: 3D Building Model Reconstruction from Point Clouds and Ground Plans. – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 33 (3-W4): 37–43.

Anschriften der Verfasser:

Dipl.-Ing. Dr. FRANZ ROTTENSTEINER
School of Surveying and Spatial Information
Systems, University of New South Wales, Sydney,
NSW 2052, Australia
Tel.: +61 2 9385 4186
Fax: +61 2 9313 7493
e-mail: f.rottensteiner@unsw.edu.au

Dipl.-Ing. CHRISTIAN BRIESE
Institut für Photogrammetrie und Fernerkun-
dung, TU Wien, Gußhausstraße 27–29, A-1040
Wien, Tel.: +43 1 58801 12211
Fax: +43 1 58801 12299
e-mail: cb@ipf.tuwien.ac.at

Manuskript eingereicht: Dezember 2003
Angenommen: Januar 2004